INVESTIGACION y CIENCIA

BASES CEREBRALES DE LAS OPERACIONES MATEMATICAS

LA DEHESA COMO ECOSISTEMA

ARQUEOLOGIA DE LA ERA ESPACIAL

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CONTROL DE LOS RELAMPAGOS MEDIANTE LASER

OCTUBRE 1997
800 PTAS.



Octubre de 1997 Número 253

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Warren Faidley

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	K. G. Preston – HAFHAM
6	David H. Funk
7	K. G. Preston – HAFHAM (*arriba izquierda*); Darryl T. Gwynne (*derecha*); Roberto Osti (*abajo*)
8	Darryl T. Gwynne (*arriba*); David H. Funk (*abajo*)
9	Darryl T. Gwynne (*arriba*); Andrew C. Mason (*abajo*)
12-13	Rob Wood (*ilustración*); Douglas C. Wallace (*escáner cerebro*)
14-15	Rob Wood (*izquierda*); Jennifer C. Christiansen (*derecha*)
16	Corbis-Bettmann
17	Douglas C. Wallace (*arriba*); Jennifer C. Christiansen (*abajo*)
18	Jennifer C. Christiansen
22-23	Warren Faidley
24	Laurie Grace (*mapa superior*); William F. Haxby (*inserto*); F. Pérez Puebla (*mapa inferior*)
25	Tom Wohlmut (*arriba y abajo izquierda*); Cortesía de Ralph Bernstein (*centro y derecha*)
26	Alfred T. Kamajian
27	Cortesía de Stan Grzybowski (*izquierda*); Eric O'Connell (*derecha*)
30-31	Stephen B. Mende y R. L. Rairden, coloreado por Laurie Grace (*fondo*); Bryan Christie (*recuadro*)
32-33	Bryan Christie (*izquierda y fondo*); Stephen B. Mende (*arriba y centro*); Daniel L. Osborne (*derecha*)
47	F. Chochon; S. Dehaene; P. F. van de Moortele y D. Le Bihan
48-49	Documentos Pour la Science
51	PLS según M. Gazzaniga *et al.*
52-53	Documentos Pour la Science
55	NASA
56	Sal Catalano (*inferior izquierda*); A. C. Roosevelt (*fotografías*)
57	Newell Colour
58-59	Cortesía de Farouk El-Baz (*fotografías*); Laurie Grace (*dibujo*)
60-61	Cortesía de Gennady Gorelik
62	Cortesía de Gennady Gorelik (*documentos*); AIP Emilio Segrè Visual Archives (*fotografía*)
63	Cortesía de Gennady Gorelik (*izquierda y centro*); AIP Emilio Segrè Visual Archives (*derecha*)
64-65	Cortesía de Gennady Gorelik
66-67	J. Gallardo
68-73	Angel Puerto
74-81	Le Scienze
84	Bryan Christie
85	Johnny Johnson
86-88	Michael Goodman

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *Regalos glandulares*; Esteban Santiago: *Funcion normal y patológica del ADN mitocondrial*; Manuel Puigcerver: *Control de rayos mediante láser*; Luis Bou: *Resplandores entre la Tierra y el espacio*, *De cerca*, *¿Cómo calcula nuestro cerebro?*, *Arqueología de la era espacial* y *Juegos matemáticos*; Juan Pedro Campos: *El expediente policial de Lev Landau*; José María Valderas Martínez: *El tiempo en psicología*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Glenn Zorpette; Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

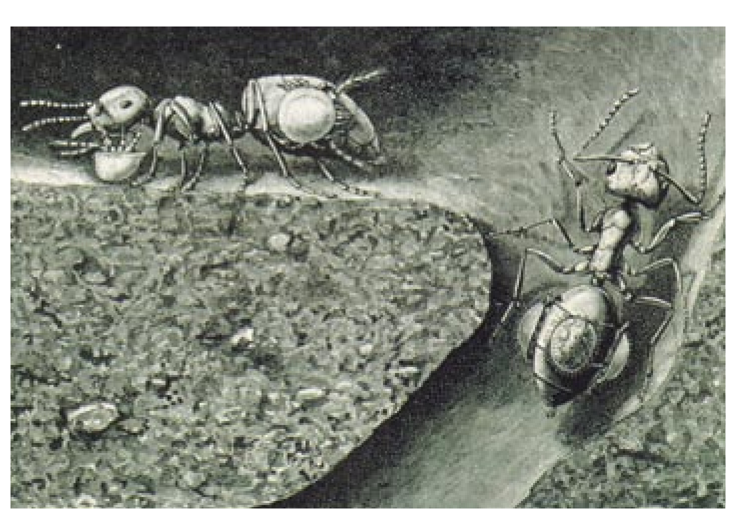
CUARZO SINTÉTICO. «Los Laboratorios de Investigación Naval (Washington, D.C.), tan pronto como dispongan de las instalaciones para ello, producirán cristales de cuarzo, necesarios para aparatos ópticos y electrónicos, y hasta el momento sólo obtenibles de yacimientos naturales dispersos. El proceso se basa en técnicas desarrolladas en Alemania y consiste en hacer crecer cada cristal a partir de una semilla introducida en una solución de sílice, hidróxido o carbonato sódico y agua, calentada hasta 350 o 400 grados centígrados. Las presiones generadas pueden alcanzar de 140 a 210 atmósferas.»

...cien años

INVESTIGACIONES EN EL ARTICO. «La última aventura ártica de R. E. Peary, teniente de la Armada estadounidense, aunque carente de peripecias o descubrimientos sensacionales, desde el punto de vista científico fue coronada por el éxito. El gran meteorito y la colección de muestras recogidas bien merecen todos los gastos y los esfuerzos invertidos en la expedición. Su buque, el Hope, arribó a Cabo Breton el 20 de septiembre con la línea de flotación casi en el mismo lugar que cuando zarpó de puerto rumbo al norte, pese a llevar en la bodega el enorme meteorito de Cabo York envuelto en toneladas de lastre. Se estima que este meteorito pesa unas 90 toneladas y se compone de un 92 por ciento de hierro y un 8 por ciento de níquel.» [*Nota de la Redacción: El meteorito se exhibe en el Museo Americano de Historia Natural de la Ciudad de Nueva York.*]

PARÁSITOS DE LAS HORMIGAS. «Uno de los parásitos más comunes de las hormigas es el ácaro antenóforo *Lasius uhlmanni*. No se mueve por el interior del nido, sino que vive siempre en el cuerpo de las hormigas. Por regla general, una hormiga carga con un ácaro bajo la cabeza y dos a izquierda y derecha del abdomen [*véase la ilustración, a la izquierda*]. En cuanto el antenóforo consigue trepar en una hormiga, ésta, aun en el caso de que ya cargue con algunos de ellos, forcejea vigorosamente, pero no tarda en resignarse al esfuerzo de cargar con su nuevo peso. Otro parásito muy común es el *Discopoma comata* [*en la parte derecha de la ilustración*].

ARSÉNICO Y PAPEL PINTADO ANTIGUO. «Todo el mundo sabe que los pigmentos con contenido de arsénico son dañinos para la salud. Se ha descubierto que el papel pintado arseniado, si cubre las paredes de habitaciones húmedas, ha sido causa frecuente de casos de envenenamiento crónico en los habitantes. Por primera vez el profesor Emmerling, de la Universidad de Berlín, ha efectuado investigaciones extensivas sobre el particular. Los resultados parecen confirmar la corrección de la teoría de que el polvo que se desprende de las paredes al limpiarlas, y también por las dilataciones y contracciones debidas a los cambios térmicos, se esparce en el ambiente y penetra en los pulmones de los ocupantes, lo que origina el envenenamiento.»



Parásitos de hormigas

...ciento cincuenta años

TELESCOPIO TÉRMICO. «El profesor Joseph Henry, de Princeton (New Jersey), informa de algunos interesantes experimentos realizados con un aparato termoeléctrico capaz de indicar una milésima de grado centígrado. Este aparato se empleó para construir un telescopio térmico: al ser girado hacia el cielo se encontró que la parte más fría estaba directamente encima de la cabeza. Experimentos efectuados con las manchas solares mostraron que eran más frías que las partes circundantes; y asimismo que la superficie de ese cuerpo celeste no está uniformemente caliente. El telescopio térmico, cuando se haya perfeccionado, podría revelar nuevos hechos en astronomía, hechos que hasta ahora ni siquiera imaginamos.»

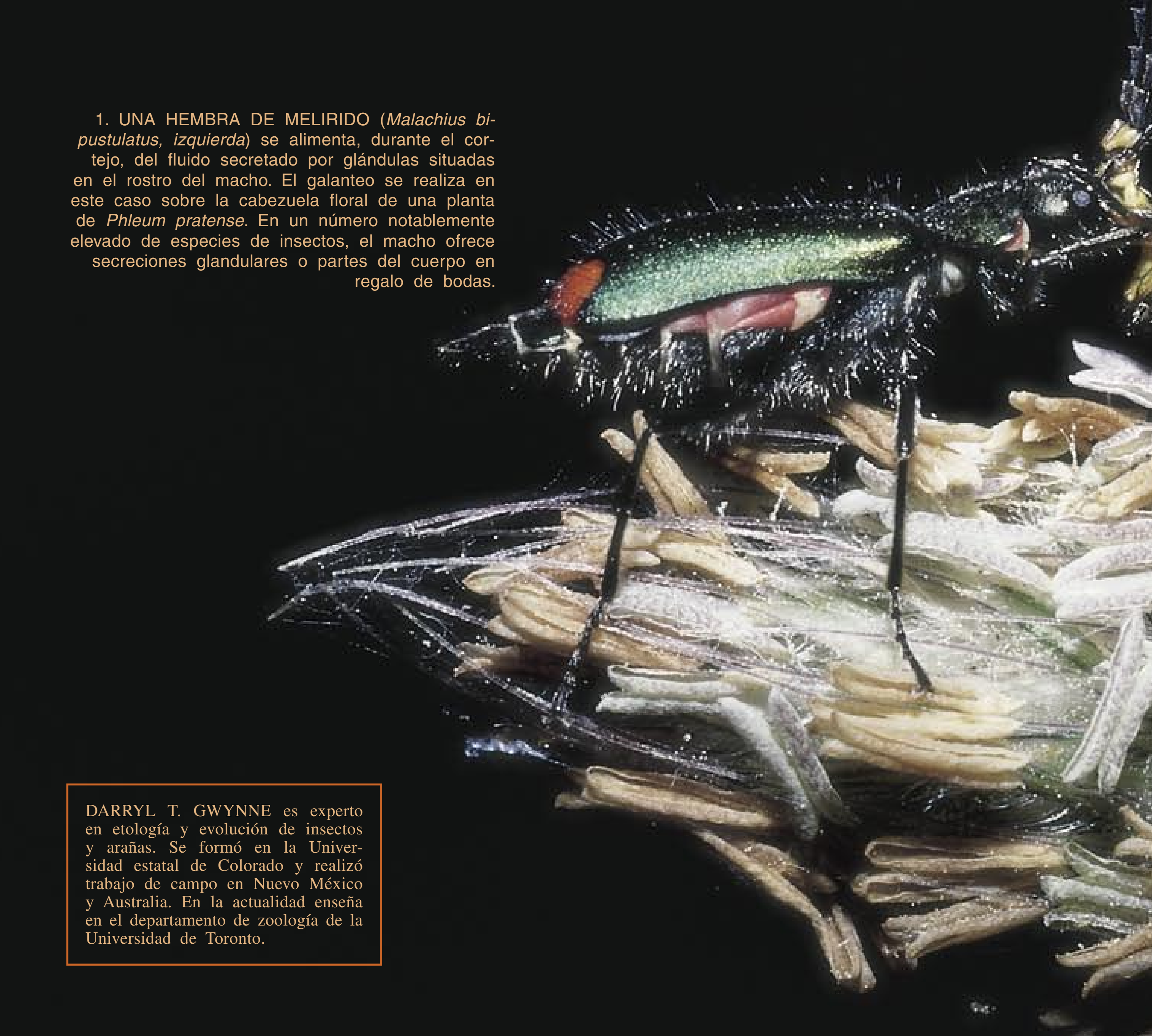
EL AGUA COMO COMBUSTIBLE. «Esta aparentemente extraña idea tiene su origen en un observación de Sir Humphrey Davy en el sentido de que, ante un eventual agotamiento del carbón, el hombre tendrá que recurrir al hidrógeno del agua como medio de obtener luz y calefacción [calor]. Como el gas empleado en iluminación se compone de hidrógeno y un poco de carbono, sólo habría que añadir este último, tras haber descompuesto el agua en sus componentes elementales de hidrógeno y oxígeno.»

ROCAS FLOTANTES. «La Asociación de Geólogos Americanos acaba de clausurar su reunión anual. Gran parte de sus debates se centraron en las enormes rocas redondeadas (“bolders”) que se encuentran en diferentes lugares de nuestro continente, en averiguar su origen, de dónde proceden y cómo nos llegaron. Parece que la explicación está en la teoría de la ‘Deriva’, según la cual este continente fue en un tiempo el lecho de un mar y que esas rocas las transportaron los icebergs desde el Polo Norte. La teoría tiene un fondo movedizo.»

REGALOS GLANDULARES

También en las chicharras, la manera de llegar al corazón es a través del estómago

Darryl T. Gwynne



1. UNA HEMBRA DE MELIRIDO (*Malachius bipustulatus, izquierda*) se alimenta, durante el cortejo, del fluido secretado por glándulas situadas en el rostro del macho. El galanteo se realiza en este caso sobre la cabezuela floral de una planta de *Phleum pratense*. En un número notablemente elevado de especies de insectos, el macho ofrece secreciones glandulares o partes del cuerpo en regalo de bodas.

DARRYL T. GWYNNE es experto en etología y evolución de insectos y arañas. Se formó en la Universidad estatal de Colorado y realizó trabajo de campo en Nuevo México y Australia. En la actualidad enseña en el departamento de zoología de la Universidad de Toronto.



En 1859, el año en el que la teoría evolutiva irrumpió en escena con la publicación de *El origen de las especies*, el capitán John Feilner, del arma de Caballería de los Estados Unidos, se hallaba explorando California septentrional. Los indios acabarían con su vida, pero antes enviaría a la Institución Smithsoniana sus observaciones sobre las costumbres de los saltamontes. Después de la cópula, señalaba, "una bolsita (evidentemente el ovario) cuelga prendida del cuerpo de la hembra, cerca de la cola".

Casi medio siglo después y al otro lado del globo, en Francia, un pionero de la etología, Jean Henri Fabre, abundaba en los pormenores de tan curiosa cópula. En *La vida del saltamontes*, volumen dedicado a los insectos ortópteros de sus *Recuerdos entomológicos*, Fabre señaló correctamente que la bolsa provenía del macho. Escribía allí que una estructura opalescente "similar en tamaño y color a una baya de muérdago" estaba pegada al espermatóforo, un paquete lleno de esperma, que la hembra consumía en el "banquete final" que culminaba la secuencia de apareamiento.

2. EL ESPERMATOFILAX, una bolsa de comida que se transfiere con el esperma, constituye el regalo habitual en las chicharras o langostas verdes (Tetigónidos) y grillos emparentados. Aquí se ilustran tres especies que lo están consumiendo (*de izquierda a derecha*): una langosta verde norteamericana (*Conocephalus strictus*); una chicharra brasileña que imita una hoja (no determinada), y una chicharra del polen australiana (*Kawanaphila nartee*).

Para los biólogos, esta inversión extrema en el apareamiento constituye un misterio. Los machos consignan el material genético en un elemento barato, en sus gametos o espermatozoides. Obtienen el mayor beneficio reproductivo, así se supone, de la estrategia que consiste en primar cópulas reiteradas, en vez de apostar cuanto poseen por una sola cópula. Las hembras, por contra, producen gametos caros: los óvulos, que contienen material genético y nutricio; además, suelen dedicar un esfuerzo notable a asegurar el rendimiento de cada cópula. Por ese motivo, eligen cuidadosamente a su pareja.

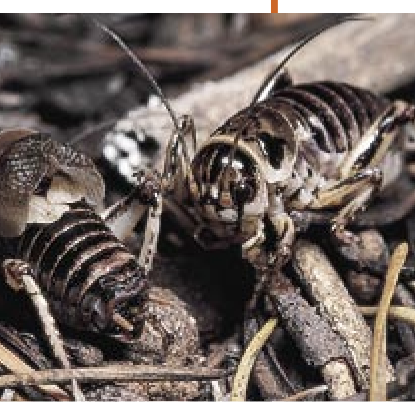
El fundamento de la inversión puesta en juego por el macho puede residir en la selección natural o en la selección sexual, los procesos que Darwin consideró agentes de la evolución biológica. La selección natural surge de la lucha para reproducirse. La selección sexual deriva exclusivamente de la competencia por la pareja; o, como explicaré en el caso de los regalos glandulares, por la inseminación.

Las dádivas típicas de muchos grillos y chicharras son comidas postcoitales: las hembras las comen después de la cópula, mientras el espermatóforo, fijado externamente, eyacula a modo de jeringa. Quiere ello decir que en estas especies la eyaculación acontece una vez que la pareja se ha separado. La coincidencia, en el tiempo, entre banquete nupcial y transferencia de esperma motivó que B. T. Boldyrev avanzara en 1915 una posible razón de la bolsa de comida de la chicharra o contribuciones similares. En opinión del biólogo ruso, esta bolsa, a la que denominó espermatófilax, servía para distraer a la hembra y evitar que se comiera el espermatóforo, fuente probable de nutrición por sí mismo. Cualquier demora conseguida de esa forma favorecería la fecundación de más huevos, porque se transferiría mayor cantidad de eyaculado. Con esa estrategia, el macho que ofrece el regalo vence en la competencia con el esperma de otros machos ya almacenado en el interior de la hembra. (En los insectos el esperma se almacena en un órgano especial que poseen las hembras, la espermateca, que apareció por evolución con ese propósito.)

La hipótesis según la cual el banquete nupcial resultaba de la selección sexual fue desarrollada ulteriormente por Nina Wedell, de la Universidad de Estocolmo. Defendía ésta la existencia de una carrera armamentística entre los sexos en el curso de la evolución. Los machos habían desarrollado el espermatófilax tentador para impedir que las hembras se comieran su esperma. Después, las hembras avanzaron hacia la cópula reiterada (para obtener quizá comidas adicionales); ante ello, los machos se vieron inducidos a suministrar más esperma para desbancar a los gametos de sus rivales. En consecuencia, hubo que idear una bolsa de comida más capaz para proteger la bolsa de esperma mayor.

Robert L. Trivers, de la Universidad de Rutgers, ofreció una hipótesis alternativa para explicar los regalos nupciales. Señaló que la inversión puesta en juego por el macho podría ser una suerte de atención paterna indirecta: la selección natural actuaría en el sentido de inducir a los machos a aportar más nutrientes, que pasarían a los óvulos con el provecho consiguiente de su propia progenie.

3. LAS ALAS POSTERIORES CARNOSAS del macho del grillo de las artemisas (*Cyphoderris strepitans*, Háglidos) se ofrecen a la hembra (*que aparece arriba*) durante la cópula. En esta secuencia, sin embargo, la hembra daña también las alas anteriores del macho (*extremo derecho*).











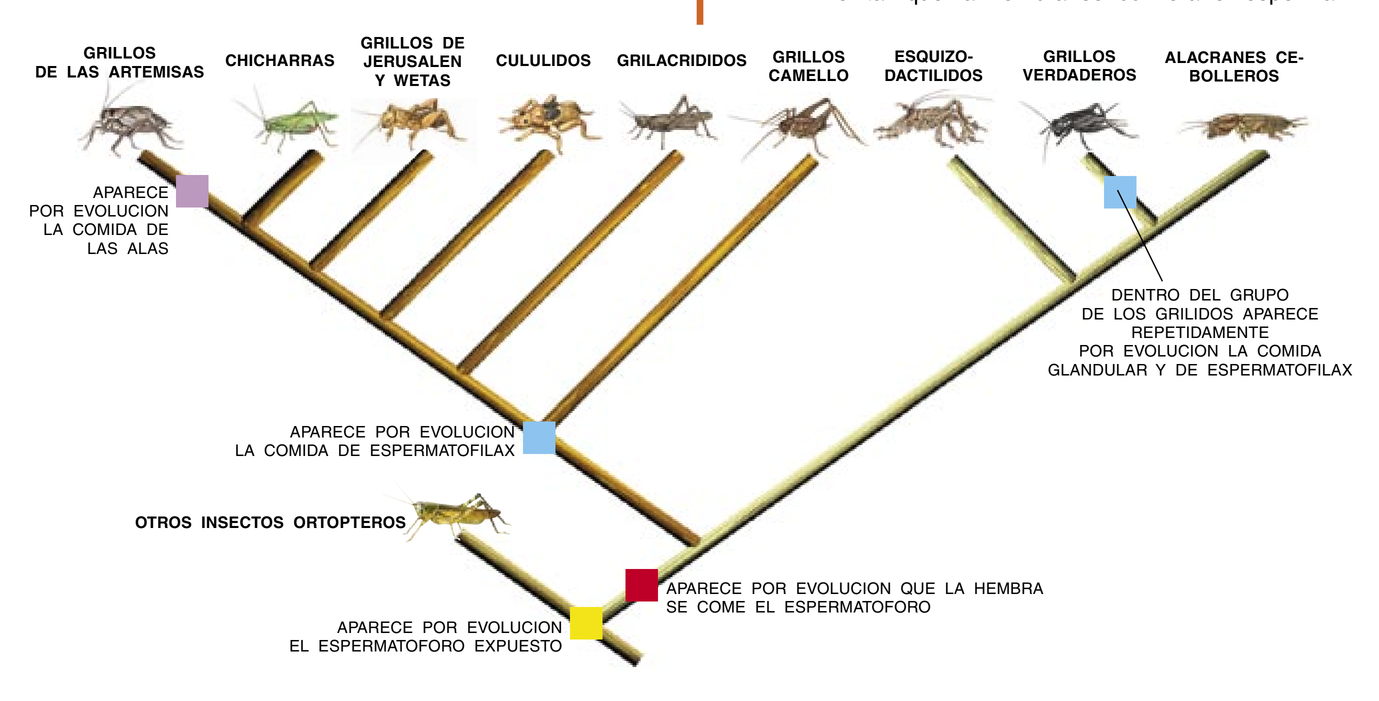
Todo queda en familia

Pero las hipótesis mencionadas no se excluyen mutuamente. De su inversión el macho podría recibir una contraprestación doble. Cabía incluso la posibilidad de que el rasgo apareciera con una misión determinada en el curso de la evolución para terminar adquiriendo otra. Decidí comprobar esta última posibilidad estudiando el registro histórico.

Para llegar al origen de una adaptación hay que seguirle el rastro por distintos taxones (grupos de organismos emparentados). Por ejemplo, si todos los organismos de la copa de un árbol filogenético (un árbol genealógico que muestra el parentesco y los lazos hereditarios de un grupo de organismos) presentan una determinada característica, podemos inferir que el organismo antepasado común también la poseía. Me apoyé en ese razonamiento para abordar el origen de los ofrecimientos nupciales del macho en el grupo de los grillos y las chicharras o langostas verdes.

Como ocurre en los saltamontes cuernicortos, los espermatóforos de la mayoría de los insectos se introducen en el interior de la hembra. En consecuencia, si la aportación del macho surgió para evitar cualquier obstáculo contra la transferencia de esperma, no pudo haber emergido hasta que apareció un espermatóforo externo y comenzó el

4. EL ARBOL EVOLUTIVO de grillos y chicharras (pertenecientes al orden de ortópteros Ensíferos) indica que los espermatóforos expuestos y vulnerables fueron los primeros en aparecer por evolución ( ). A continuación aparecieron los banquetes nupciales, en forma de un espermatófilax, o bolsa de comida ( ). La secuencia sugiere que los banquetes evolucionaron para evitar que la hembra se comiera el esperma.



5. GRILLOS MORMONES EN MIGRACION cerca de St. Anthony, Idaho. Mientras migran pueden encontrar muy poca comida. Para obtener el espermatófilax las hembras buscan aparearse agresivamente, a la manera en que lo hace la chicharra del polen australiana (*extremo derecho*): dos hembras forcejean por montar un macho dispuesto.

consumo por parte de la hembra de tan vulnerable formación. Mi análisis corroboraba esta secuencia de acontecimientos evolutivos. Repasados uno por uno los taxones del dendrograma de grillos y chicharras, se observa que la hembra se come el espermatóforo; por tanto, es de presumir que también lo hiciera el grillo situado en la base del árbol filético. Además, prácticamente todos los taxones de la rama izquierda del árbol (y unos cuantos de la rama derecha) ofrecen el espermatófilax en regalo, lo que indica que este refinamiento apareció algo más tarde. La verdad es que el estudio comparativo nos lleva a aceptar una docena de orígenes independientes de las pitanzas de tipo glandular o de otras zonas del cuerpo. En esa docena hemos de incluir tres líneas de origen distintas para el espermatófilax. (Curiosamente, la ofrenda nupcial más común en el reino animal —a saber, las presas u otros alimentos recolectados por el macho, en contraposición a sus tejidos o secreciones— no existe en absoluto en los Ortópteros.)

De ciertos ensayos experimentales se desprende que los machos no proporcionan más alimento del que es necesario para dar tiempo a la transferencia segura del esperma. Se corrobora así que el papel protector que en los ancestros tenían las comidas glandulares se continúa en la mayoría de las especies actuales de chicharras y grillos. Además, la transferencia eficaz de esperma que una comida abundante permite, favorece las posibilidades de ser el progenitor de la descendencia. Wedell, tras aparear dos machos de *Decticus verrucivorus* con una misma hembra, observó que la proporción de descendientes que engendra un macho guarda relación directa con el tamaño de la comida que ofrece, comparada con la que regala su rival.

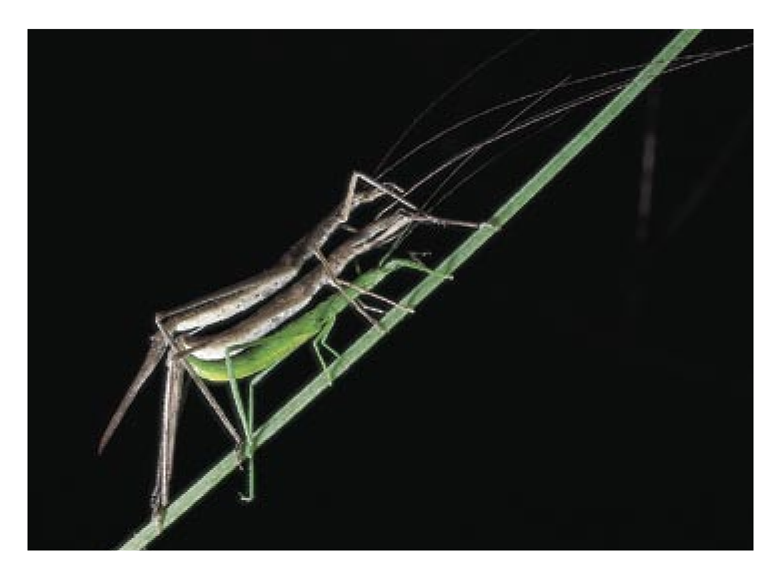
A una pauta similar se llegó en el análisis de paternidad de un artrópodo distinto, en el que la comida acaba con la carrera reproductora del macho. El macho de la araña dorsirroja australiana es minúsculo; cae víctima de canibalismo en las dos terceras partes de las cópulas porque, durante la inseminación, efectúa un salto mortal que termina en las fauces de su pareja, de tamaño mucho mayor. Semejante destino se ha atribuido a un proceso evolutivo que remataría la inversión con una donación nutricia. Sin embargo, Maydianne C. B. Andrade, en la Universidad de Toronto cuando realizó sus experimenos, demostró que la autoinmolación del macho no diverge de lo buscado en la mayoría de los banquetes de apareamiento: no se trata de aportar alimento, sino de prolongar el coito.

Este bocado suicida distrae a la hembra, dilatando el tiempo de transferencia del esperma y aumentando el número de huevos fecundados. Además, aunque el regalo somático de la araña y la comida de *D. verrucivorus* contienen algo de alimento, no encierran

6. GLANDULAS METATORACICAS del dorso del macho proporcionan una comida postcopulatoria (*derecha*) para la hembra del grillo arborícola *Neoxabea bipunctata* (Grílidos). Puede verse la bolsa espermática que cuelga de la punta del abdomen de la hembra. La hembra del grillo terrícola *Allonemobius allardi* (*abajo*) ingiere una secreción glandular de un espolón tibial modificado de la pata del macho.



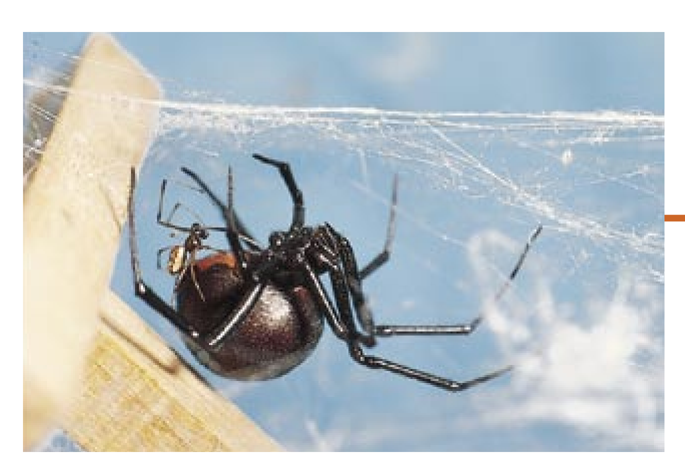




ningún valor en punto a reproducción o supervivencia de la hembra. Semejante grado de entrega no altera la regla según la cual el esfuerzo empeñado por el macho en el apareamiento se propone fecundar tantos huevos como sea posible. La idea de alimentar a la progenie queda, pues, al margen.

La araña dorsirroja australiana es una viuda negra (del género *Latrodectus*). Las hembras de otras especies de viuda negra se caracterizan por comerse al macho después del apareamiento. No parece, sin embargo, que este canibalismo haya de entenderse como una ofrenda o regalo. No se ve a los machos muy dispuestos a tal fin. Dígase lo mismo de otras cópulas arriesgadas; así, las de ciertas mantis religiosas, en las que los machos intentan con todas su fuerzas escapar de las garras de su pareja.

La selección sexual se nos presenta, pues, como la regla que rige las pitanzas nupciales. Algunos banquetes aumentan la eficacia genética de las hembras, quizá debido a que las hembras que les precedieron en el árbol filogenético preferían ofrendas más nutritivas. Se sabe que las comidas de apareamiento de ciertas chicharras incrementan no sólo el número, sino también el tamaño de los huevos; un peso mayor redobla las probabilidades de que un huevo sobreviva al invierno. William Brown, de la Universidad de Toronto, comprobó que las secreciones lamidas por la hembra, procedentes de una minúscula glándula en "tazón de caldo" del dorso del macho, contenían un elixir de composición desconocida que aumenta la longevidad de la hembra.



7. EL MACHO DE LA ARAÑA DORSIRROJA AUSTRALIANA ofrece su cuerpo entero a la hembra (*individuo grande*). Después de insertar su palpo copulador, efectúa un salto mortal y termina dentro de las mandíbulas de la hembra; ésta come durante la transferencia del esperma. El sacrificio (de valor nutricio despreciable) prolonga la duración de la cópula y, con ello, el número de huevos fecundados.

Pero tales efectos positivos no confirman por sí solos la hipótesis paterna. Nada impide que sea nutritiva la comida que se ha seleccionado por evolución para distraer de la función sexual. Para poder hablar de una función relacionada con la paternidad debe quedar claro que el macho nutre a su propia progenie, no a la de otros. En dos especies de chicharras australianas, los machos parecen seguros de su paternidad porque los huevos se ponen antes de que la hembra torne a aparearse; además, dichos huevos son más gordos cuando la comida nupcial es mejor.

Los machos de los escarabajos de color de fuego (*Neopyrochroa flabellata*) podrían también haber evolucionado en el sentido de invertir en la descendencia. Su apuesta no sería alimentaria, sino que comportaría una secreción química para proteger de los depredadores a la progenie. El equipo encabezado por Thomas Eisner, de la Universidad de Cornell, examinó el uso que el escarabajo hacía de la cantaridina, que es la sustancia química activa del afrodisíaco (bastante peligroso) de la cantárida (*Meloe*). Tras ingerir cantaridina, el macho almacena una fracción pequeña de la misma en una glándula cefálica, depositándose el resto en glándulas abdominales especializadas. Durante el cortejo, las hembras prueban las glándulas cefálicas y se aparean con los machos que han comido cantaridina, rechazando a los demás. A continuación, los machos eyaculan la mayor parte de su reserva de cantaridina en las hembras, que la incorporan en sus huevos. Los machos son honrados: regalan su reserva de cantaridina en vez de guardarla para atraer a nuevas hembras. De lo que podemos colegir que la sustancia química cumple una función nutritiva, paterna, más que de explotación sexual.

Cambio de papeles

Dos chicharras conocemos en las que el espermatófilax parece haber cambiado su función primigenia de distracción hacia otra misión, relacionada con la nutrición de la progenie. En el caso de la chicharra de jardín australiana (*Requena verticalis*), el macho proporciona una comida mayor que la necesaria para distraer a su pareja y asegurar una inseminación completa. Aun así, las presiones de la selección sexual nunca acaban de desaparecer. Leigh W. Simmons y sus colegas, de la Universidad de Australia occidental, demostraron que los machos guardan los mejores banquetes para su apareamiento con hembras jóvenes y saludables. Joven es la hembra de una semana de vida adulta desde que mudó; vieja, la de tres semanas, con gran probabilidad de haber almacenado esperma de machos rivales. Cuando se aparean con las hembras más viejas (la paternidad de cuyos descendientes es cuestionable), los machos muestran una sutil forma de discriminación al transferir comidas de espermatófilax menor.

La idea de que los machos eligen a su pareja me lleva a un giro final en la historia de los regalos seminales. La evolución de un espermatófilax grande y nutritivo en varias especies ha subvertido, de forma paradójica, las pautas habituales de selección sexual, a tenor de las cuales los machos compiten por una misma pareja y son las hembras las que eligen. Se observa ese comportamiento insólito en el grillo mormón, un auténtico flagelo para los campos del oeste americano, y casi con toda seguridad el saltamontes que el capitán Feilner observó "en tan gran número que cubría por completo el suelo". A estas densidades, hay muy poco alimento que repartirse. Y el hambre produce curiosos efectos. Los machos se aparean con menos frecuencia porque ya no pueden producir muchas comidas que regalar; las hembras, en cambio, se tornan más libidinosas, con un instinto acrecentado de buscar sustento. Estos cambios invierten de manera espectacular el comportamiento sexual arquetípico.

Si Feilner hubiera vivido más años y los hubiera dedicado a sus saltamontes, habría observado ese fenómeno. Son las hembras, y no los machos, las que luchan por el acceso a la pareja. Mientras tanto, los machos se tornan muy circunspectos y remilgados sobre la hembra a la que favorecer con tan costoso regalo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ORTHOPTERAN MATING SYSTEMS: SEXUAL COMPETITION IN A DIVERSE GROUP OF INSECTS. Dirigido por D. T. Gwynne y G. K. Morris. Westview Press, 1983.

THE EVOLUTION OF SEXUAL DIFFERENCES IN INSECTS. Randy Thornhill y Darryl T. Gwynne en *American Scientist*, vol. 74, nº. 4, páginas 382-389; julio-agosto 1986.

APAREAMIENTO DE LOS GRILLOS ARBORÍCOLAS. D. H. Funk en *Investigación y Ciencia*, págs. 50-59; octubre, 1989.

EXPERIMENTAL REVERSAL OF COURTSHIP ROLES IN AN INSECT. D. T. Gwynne y L. W. Simmons en *Nature*, vol. 346, págs. 172-174; 12 de julio, 1990.

JEAN HENRI FABRE. Georges Pasteur en *Investigación y Ciencia*, páginas 54-61; septiembre, 1994.

Función normal y patológica del ADN mitocondrial

Las alteraciones y deficiencias que presenta el ADN extracromosómico de las mitocondrias constituyen la fuente de innumerables enfermedades, muchas de ellas atribuidas a los achaques de la vejez

Douglas C. Wallace

CELULA

MITOCONDRIA

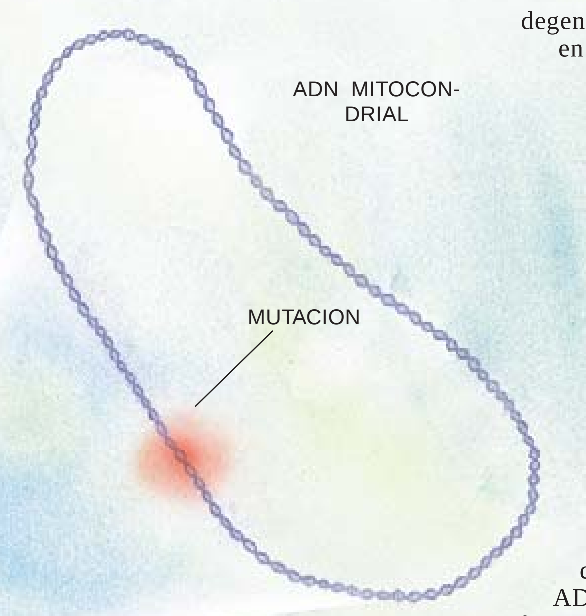
El chico, a sus cinco años recién cumplidos, rebosaba salud. Pero empezó a perder oído y quedó sordo del todo antes de los 18. En su historia se leía ya que era hiperactivo y había sufrido ataques esporádicos. A los 23 años años tenía la visión bastante deteriorada, con cataratas, glaucoma y degradación progresiva de la retina. Los ataques adquirieron después mayor gravedad y comenzaron a fallarle los riñones. La afección renal complicada con una infección sistémica se lo llevó a la tumba a los 28 años de edad.

En la raíz de todos esos trastornos se encontraba una imperfección diminuta de sus genes, aunque no de los genes habituales, los que residen en las hebras cromosómicas de ADN del núcleo celular. Su muerte se debió a una alteración de los lazos sutiles del ADN que se aloja en las mitocondrias. Son éstas los orgánulos donde se genera la energía que la célula consume. Y cada lazo de ADN contiene la información para la síntesis de 37 de las moléculas que la mitocondria necesita para producir energía.

Aunque se sabía desde 1963 que las mitocondrias de los tejidos animales albergan sus propios genes, hasta 1988 no quedó patente la vinculación de los yerros de éstos con enfermedades humanas. En mi laboratorio de la Universidad de Emory, descubrimos, en el marco de un estudio realizado con varias familias, la relación existente entre una forma de ceguera que afecta a jóvenes y adultos (neuropatía óptica hereditaria de Leber) y una pequeña mutación heredada en un gen mitocondrial. Por las mismas fechas, Ian J. Holt, Anita E. Harding y John A.

1. EN CADA CELULA del organismo hay centenares de mitocondrias. Son éstas las centrales energéticas de las células. Una mitocondria contiene varios lazos de ADN, cada uno de los cuales porta 37 genes que intervienen en la generación de energía. Las mutaciones operadas en los genes mitocondriales se heredan exclusivamente de la madre. Tales mutaciones se han vinculado con enfermedades degenerativas, a menudo graves, que afectan especialmente al cerebro y a los músculos. La imagen del cerebro (*derecha*) nos revela una condición habitual en pacientes con enfermedades del ADN mitocondrial: degeneración de los ganglios basales (*en recuadro*), que son zonas importantes para la coordinación motora.





Morgan-Hughes, del Instituto de Neurología de Londres, asociaron la deleción de segmentos extensos de la molécula de ADN mitocondrial con patologías musculares de carácter progresivo.

Hoy se sabe que las alteraciones experimentadas por el ADN mitocondrial causan, o al menos contribuyen a la aparición de un amplio repertorio de enfermedades, algunas con perfiles borrosos aunque potencialmente catastróficas. De interés quizá más general: la mutación de este ADN podría estar detrás de muchos casos de diabetes e infartos. Por no hablar de la documentación creciente que avala la tesis según la cual los daños sufridos por genes de las mitocondrias desempeñarían un papel destacado en el proceso de envejecimiento y en los procesos degenerativos y crónicos habituales en edades provectas (enfermedad de Alzheimer y alteraciones motoras).

El ADN mitocondrial ha recabado también la atención por su incidencia en otros campos. Por ejemplo, en las migraciones humanas. Al comparar las secuencias de los pares de bases del ADN mitocondrial de diferentes poblaciones se observan pautas muy interesantes acerca de la evolución y las migraciones del hombre moderno. (Los pares de bases cotejadas son los "peldaños" o unidades de codificación de la "escalera" de ADN.) Por su parte, los médicos forenses han empezado a sacar partido de las comparaciones a pequeña escala entre secuencias de ADN en la identificación de restos de soldados desaparecidos en combate (o de otros desaparecidos antaño) y en la determinación de si un imputado es o no responsable de los hechos que se le atribuyen.

Resulta llamativo que se haya tardado tanto en abordar las posibilidades que ofrece el ADN mitocondrial. Sin duda, se podrían haber sospechado antes las consecuencias patológicas de las mutaciones genéticas mitocondriales. Las mitocondrias aportan el 90 por ciento de la energía que las células —y, por ende, tejidos, órganos y el organismo en su conjunto— necesitan para desenvolverse.

Las mitocondrias generan energía a través de un proceso que requiere el flujo de electrones a través de una serie de complejos proteicos (la así llamada cadena respiratoria). Este flujo capacita indirectamente a otro complejo (la ATP sintasa) para sintetizar ATP (trifosfato de adenosina), la molécula portadora de energía de las células.

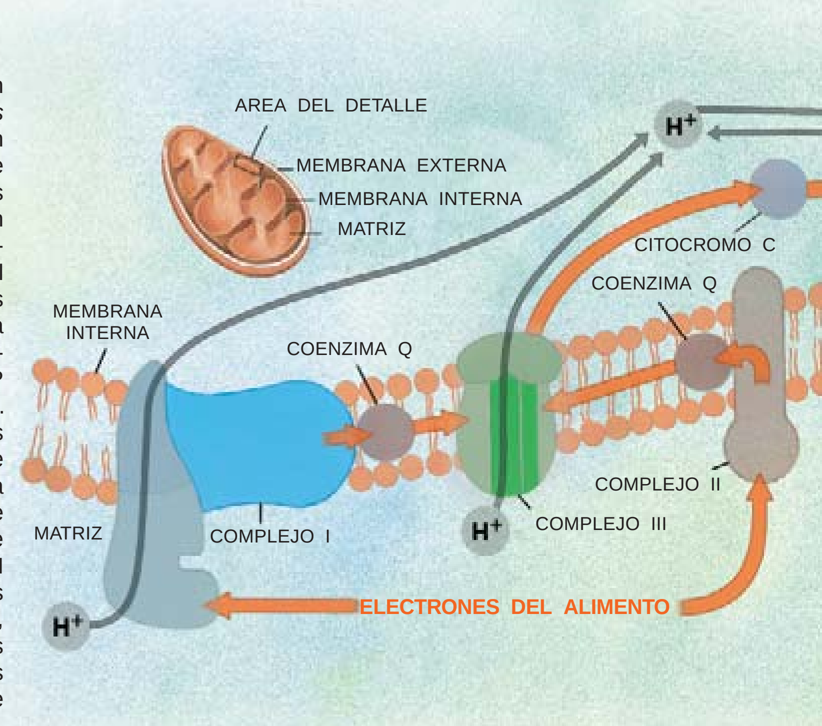
Desde muy pronto se adivinó que cualquier cosa capaz de comprometer la producción de ATP en la mitocondria podría dañar, si no matar, las células con el consiguiente desarrollo de alteraciones funcionales en los tejidos y aparición de los síntomas. De hecho, el grupo encabezado por Rolf Luft, del Instituto Karolinska y la Universidad de Estocolmo, publicaba en 1962 que cierto fallo en la generación de energía mitocondrial provocaba un trastorno debilitante. Con los años, acabó averiguándose que los tejidos y órganos que antes se resienten de la caída de producción energética son, en orden decreciente, el sistema nervioso central, músculo cardíaco y esquelético, riñones y tejidos productores de hormonas.

Desde el principio se buscó explicación a las alteraciones mitocondriales en mutaciones de genes nucleares, algunos de los cuales dan lugar a componentes de las mitocondrias. Llegados los años ochenta, sin embargo, viose que el ADN mitocondrial portaba la información de un número notable de moléculas: no sólo especificaba la estructura de 13 proteínas (cadenas de aminoácidos) que eran subunidades de la ATP sintasa y de los complejos de la cadena respiratoria, sino que determinaba también otras 24 moléculas de ARN que intervenían en la síntesis de esas subunidades en las mitocondrias. Se infería de esas observaciones que las mutaciones del ADN mitocondrial podrían redundar en las proteínas mitocondriales o en el ARN y, de ese modo, minar la capacidad productora de energía de las mitocondrias, lo que, a su vez, sería causa de enfermedades. A esa posibilidad se aludía ya en las publicaciones de 1988.

DOUGLAS C. WALLACE ocupa la cátedra Robert W. Woodruff de genética molecular de la facultad de medicina de la Universidad de Emory. Se formó en Yale. Estando allí demostró, con otros colaboradores, que el ADN mitocondrial de las células humanas portaba información de rasgos heredables.

¿Para qué sirve el ADN mitocondrial?

Las mitocondrias producen energía en un proceso en que electrones procedentes de la alimentación (*flechas de color naranja en el diagrama de la izquierda*) discurren por la cadena respiratoria; ésta se constituye por una serie de complejos proteicos (I-IV) de la membrana interna de las mitocondrias. En el complejo IV los electrones interaccionan con el oxígeno y protones (H^+) para formar agua. Las mitocondrias utilizan la energía liberada en la oxidación del hidrógeno para bombear protones (*flechas grises*) a través de la membrana interna. La carga resultante y la diferencia de concentraciones entre ambos lados de la membrana capacitan a otro complejo, la ATP sintasa, para fabricar ATP (trifosfato de adenosina), la molécula portadora de energía. Genes del ADN mitocondrial cifran trece proteínas de los complejos; aparecen en color brillante las regiones donde se han incorporado esas proteínas. El ADN, esquematizado a la derecha, da también lugar a 24 moléculas de ARN que se utilizan para la síntesis de esas proteínas. Cada uno de los sillares estructurales (par de bases) integrantes del ADN mitocondrial se ha numerado en el sentido contrario de las agujas del reloj, a partir de la posición O_H. Se señalan, asimismo, sitios donde se producen mutaciones causantes de enfermedades. En la tabla-recuadro sobre enfermedades del ADN mitocondrial aparecen los nombres completos de los acrónimos. *—D.C.W.*



Extrañas reglas de la herencia

Desde 1988, se han venido descubriendo rasgos peculiares de síndromes que brotan de deficiencias del ADN mitocondrial. Así, los trastornos en cuestión son a menudo hereditarios, aunque su pauta de transmisión difiere de la exhibida por enfermedades que resultan de mutaciones experimentadas en genes nucleares. Y los síntomas que se manifiestan son más impredecibles que los causados por mutaciones genéticas nucleares.

Los procesos que sirven de cauce para la herencia de las enfermedades genéticas del núcleo comienzan con la fecundación de un óvulo por un espermatozoide. El embrión monocelular que surge de esta unión contiene un solo núcleo, que posee una dotación de parejas concordantes de cromosomas cargados de genes: unos 100.000 genes (extendidos a lo largo de 3000 millones de pares de bases) procedentes de la madre y otros tantos del padre. Esta célula y sus descendientes se replican repetidamente hasta formar el niño. Antes de que las células se dividan, se duplican los cromosomas; ambos progenitores legan, pues, su propio complemento de cromosomas, paternos y maternos, a la célula hija. De este modo, cada célula del organismo lleva genes idénticos e idénticas mutaciones.

¿Qué ocurre con la herencia mitocondrial? Los genes que se extienden a lo largo de los 16.569 pares de bases de cada lazo de ADN mitocondrial se heredan sólo de la madre, a través de las mitocondrias del óvulo. El espermatozoide no aporta, en este sentido, una contribución permanente. Además, cada óvulo, igual que el resto de las células del organismo, porta varios centenares de mitocondrias; cada mitocondria, a su vez, puede contener varias moléculas de ADN. Aunque la célula progenitora viene a duplicar el número de mitocondrias y de moléculas de ADN mitocondrial antes de dividirse, y provee de cantidades aproximadamente iguales a cada célula hija, la progenitora no determina qué mitocondrias específicas irán a cada una de las células hijas.

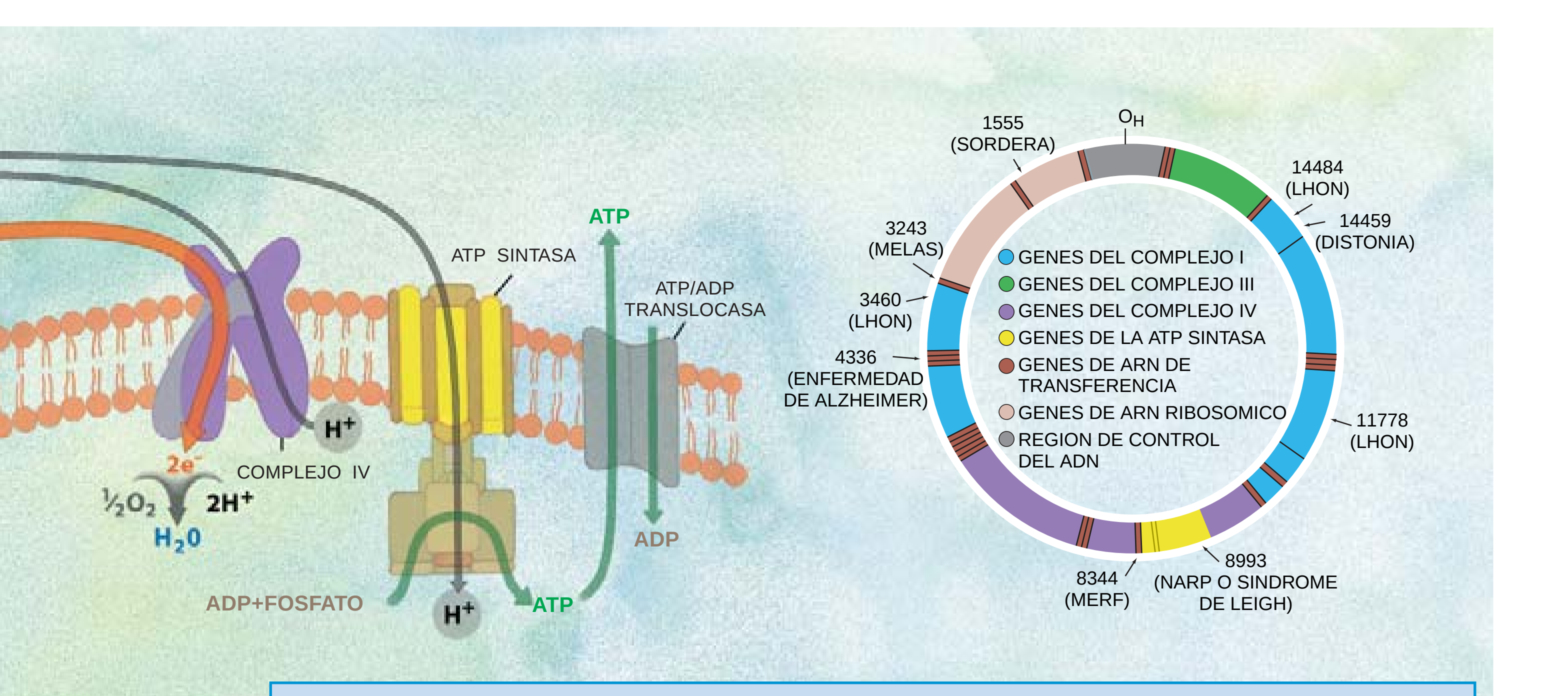
Quiere ello decir que, si un óvulo fecundado lleva una mutación en alguna fracción de su ADN mitocondrial (condición que recibe el nombre de heteroplasmia), una célula hija puede heredar un proporción mayor de mitocondrias que porten el ADN mutante, al tiempo que la otra heredará un proporción mayor de mitocondrias con ADN normal. Las leyes de la probabilidad dictan que, a medida que las células continúen reproduciéndose, las poblaciones de ADN mitocondrial en las células hijas emergentes se moverán hacia la uniformidad (homoplasmia): tenderán a estar constituidas por moléculas predominantemente normales o predominantemente mutantes.

Un niño nacido de un embrión heteroplásmico puede tener, pues, unos tejidos enriquecidos en ADN mitocondrial normal y otros enriquecidos en ADN mutante. Además, los óvulos de una mujer con células heteroplásmicas pueden diferir en la proporción de su ADN mitocondrial mutante; sus hijos pueden, por tanto, diferir bastante en lo concerniente a intensidad y grado de distribución de moléculas mutantes en sus tejidos, así como en gravedad, y clase incluso, de los síntomas que presenten. Sin embargo, los individuos en los que se manifieste una enfermedad desencadenada por una mutación homoplásmica presentarán síntomas semejantes.

Perfiles de estas enfermedades

Los defectos del ADN mitocondrial causantes de las enfermedades suelen heredarse. A veces, sin embargo, surgen de manera espontánea en etapas precoces del desarrollo embrionario. Ambos tipos de mutaciones, adquiridas y heredadas, cuando se van distribuyendo por el organismo a medida que se desarrolla el feto, pueden producir efectos profundos.

Por fin, pueden producirse mutaciones del ADN mitocondrial en los tejidos en el curso de la vida; nos referimos a mutaciones distintas que pueden experimentar células diferentes e incluso diferentes moléculas de ADN mitocondrial en una misma



Enfermedades del ADN mitocondrial

Esta relación recoge un breve muestrario de las enfermedades cuya causa se debe a mutaciones en el ADN mitocondrial. Algunas de estas afecciones pueden tener también su origen en mutaciones nucleares u otros procesos que alteren la función mitocondrial.

ENFERMEDAD	CARACTERISTICAS
Enfermedad de Alzheimer	Pérdida progresiva de la capacidad cognitiva
CPEO (Oftalmoplejía externa progresiva crónica)	Parálisis de los músculos del ojo y miopatía mitocondrial
Diabetes mellitus	Niveles elevados de glucosa que originan diversas complicaciones
Distonía	Movimientos anormales relacionados con rigidez muscular; con frecuencia se acompañan de degeneración de los ganglios basales
KSS (Síndrome de Kearns-Sayre)	CPEO combinada con otros trastornos como la degeneración de la retina, cardiopatías, pérdida de audición, diabetes y fallo renal
Síndrome de Leigh	Pérdida progresiva de las capacidades motora y verbal y degeneración de los ganglios basales; es una enfermedad potencialmente letal en el niño
LHON (Neuropatía óptica hereditaria de Leber)	Ceguera permanente o temporal debida a la lesión del nervio óptico
MELAS (encefalomiopatía mitocondrial, acidosis láctica y episodios que se asemejan a una apoplejía)	Disfunción del tejido cerebral (que a menudo provoca ataques, parálisis regional transitoria y demencia) combinada con miopatía mitocondrial [*véase abajo*] y una acumulación tóxica de ácido láctico en la sangre
MERF (epilepsia mioclónica y fibras rojas de aspecto raído)	Ataques combinados con miopatía mitocondrial; puede también presentarse pérdida de audición y demencia
Miopatía mitocondrial	Deterioro muscular, manifestado por debilidad e intolerancia para el ejercicio; el músculo presenta a menudo fibras rojas de aspecto raído, repletas de mitocondrias anormales que se tornan rojas con un determinado colorante
NARP (debilidad muscular neurogénica, ataxia y retinitis pigmentosa)	Pérdida de fuerza muscular y coordinación, acompañada de degeneración cerebral regional y deterioro de la retina
Síndrome de Pearson	Disfunción de la médula ósea en la infancia (que conduce a una pérdida de células de la sangre) y fallo pancreático; los pacientes que sobreviven acaban también presentando el síndrome de Kearns-Sayre (KSS)

célula. A estos cambios se les llama mutaciones somáticas.

La acumulación de mutaciones somáticas podría ayudar a explicar dos rasgos frecuentemente observados en las enfermedades del ADN mitocondrial de carácter hereditario. En las personas que nacen con mutaciones de ADN mitocondrial las enfermedades tardan años en manifestarse, decenios incluso, para agravarse la sintomatología con el paso del tiempo. Para mi grupo de investigación, muchas de las mutaciones en el ADN mitocondrial heredadas afectan a la función mitocondrial sólo de una manera sutil, permitiendo que los tejidos del organismo produzcan la energía que necesitan, al menos durante algún tiempo. Pero la acumulación aleatoria de mutaciones somáticas en el curso de la vida deprime aún más la producción de energía, hasta que llega el momento en que en un tejido determinado el nivel de energía desciende a valores bajísimos, incompatibles con el funcionamiento normal. El tejido comienza a fallar y aparecen los síntomas. Con la acumulación ulterior de nuevas mutaciones somáticas, el rendimiento energético se resiente cada vez más mientras se agravan los síntomas.

Para ser precisos, lo mismo las mutaciones heredadas que las somáticas provocan la enfermedad por caminos que trascienden la simple caída de suministro energético. Conforme la cadena respiratoria participa en la producción de energía se generan unos subproductos, los radicales libres de oxígeno. Estos derivados del oxígeno, que llevan electrones desapareados y son, por tanto, muy reactivos, pueden atacar todo tipo de componentes celulares, incluidas las proteínas de la cadena respiratoria y el ADN mitocondrial. Cuanto impida el flujo de electrones por la cadena respiratoria aumentará su transferencia a moléculas de oxígeno y promoverá la generación de radicales libres. Bastaría, pues, con una sola mutación para iniciar un ciclo recurrente de transporte inhibido de electrones, lo que fomentaría la producción de nuevas mutaciones de ADN mitocondrial.

Por lo general, si el ADN mitocondrial sufre una mutación grave, capaz de bloquear la producción de energía y desencadenar una enfermedad que amenace la vida en sus primeras fases, esa mutación acabará siendo heteroplásmica; es decir, el gen mutante terminará coexistiendo en los tejidos del paciente con la versión normal del gen. Para explicar ese fenómeno se apela al siguiente razonamiento: las mutaciones homoplásticas graves (que residen en cada copia de un determinado gen y en todos los tejidos) reducirían la producción de energía tan profundamente que serían letales antes del nacimiento, y por ello nunca se observan en los pacientes; por contra, cuando una mutación grave es heteroplásmica, las copias normales del gen afectado proporcionarán energía suficiente para permitir la supervivencia durante la infancia e incluso después. Los tipos más leves de enfermedad pueden surgir de una mutación heteroplásmica o de una homoplástica que inste sólo un ligero descenso de la producción de energía.

Mutaciones sutiles y consecuencias graves

Merece la pena detenerse en algunos ejemplos de trastornos cuya raíz se encuentra en mutaciones del ADN mitocondrial heredadas (o embrionarias). Aunque no se cuentan entre las más familiares, su estudio ha proporcionado claves importantes para desentrañar la capacidad morbigénica de las mutaciones del ADN mitocondrial. Veremos luego qué se sabe sobre el papel que las mutaciones de ADN mitocondrial heredadas y somáticas desempeñan en los procesos de envejecimiento y en enfermedades que con cierta frecuencia afectan a personas de edad avanzada.

Hay mutaciones heredadas que determinan la sustitución de una base por otra en un gen que cifra una proteína; ello supone el reemplazo de un aminoácido por otro incorrecto

Aplicación forense del ADN mitocondrial

El día 3 de septiembre de 1996, en la ciudad de Chattanooga, estado norteamericano de Tennesee, declararon culpable del asesinato de una niña de cuatro años a un individuo de 27. El veredicto se basó en el análisis del ADN mitocondrial de su saliva que coincidió con el de un pelo que se encontró sobre la víctima. Era la primera vez que en un juicio se admitió la prueba del ADN mitocondrial.

De entonces acá, su utilización se ha hecho rutinaria para determinar la identidad de restos humanos. En Estados Unidos constituye el quicio de un proyecto de identificación de fragmentos óseos de soldados que murieron en la guerra de Corea a comienzos de los años cincuenta. Por este mismo medio se ha confirmado que los huesos exhumados en Rusia en 1991 pertenecen al zar Nicolás II, y que el individuo enterrado como Jesse James en abril de 1882 era en efecto el conocido bandido.

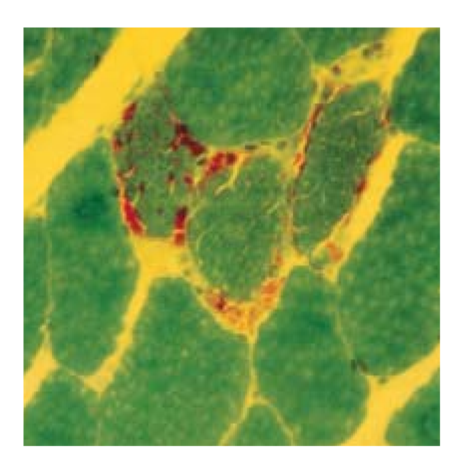
La prueba consiste, a grandes rasgos, en la comparación de las secuencias de pares de bases de las moléculas del ADN mitocondrial, especialmente el la región de control, que no contiene genes. Las secuencias de esta región son las que varían habitualmente de una persona a otra. Si el ADN de un pelo, por ejemplo, que se ha encontrado sobre el cuerpo de una víctima de un asesinato o violación, coincide con el ADN del acusado, existen muchas posibilidades de que el pelo en cuestión pertenezca al acusado. De igual manera, si el ADN mitocondrial de los huesos de un soldado muerto en el campo de batalla es muy semejante al de los miembros de una familia, los investigadores pueden sacar la conclusión de que los restos pertenecen a un miembro de la familia examinada.

Para este tipo de comparaciones se prefiere el ADN nuclear, siempre que se obtenga en suficiente cantidad, porque con él es más fácil establecer semejanzas y diferencias. Muchas veces, sin embargo, el material disponible (como puede ser un cabello, un fragmento óseo o un diente) carece de ADN nuclear utilizable, aunque puede contener ADN mitocondrial en mayor abundancia.

—D.C.W.



Jesse James, 1864



2. FIBRAS ROJAS CON ASPECTO raído, una manifestación frecuente de enfermedades musculares mitocondriales. Resaltan por la coloración roja de las mitocondrias deformadas y aumentadas que se acumulan en el interior de fibras musculares en proceso de degradación.

en la proteína codificada. Una de estas mutaciones "sin sentido" nos ilustra de forma nítida el principio arriba mencionado y según el cual una mutación del ADN mitocondrial heteroplásmica puede a menudo expresarse diversamente según los individuos. Nos referimos a la sustitución de una base en la posición 8993; tal mutación determina la sustitución de un aminoácido en una de las subunidades de la ATP sintasa (el complejo que cataliza la síntesis de ATP).

En cierta familia en la que pudieron observarse miembros de cuatro generaciones, se vio que una misma mutación desencadenaba toda una batería de males: varios individuos sufrían una degeneración leve de la retina en la periferia del campo visual (retinitis pigmentosa); otra persona padecía una degeneración grave de la retina y del sistema nervioso central, y dos niños presentaban síndrome de Leigh, potencialmente letal. Esta enfermedad aniquilante, infantil, se caracteriza por una degeneración bastante rápida de los ganglios basales, región cerebral que interviene en la coordinación del movimiento.

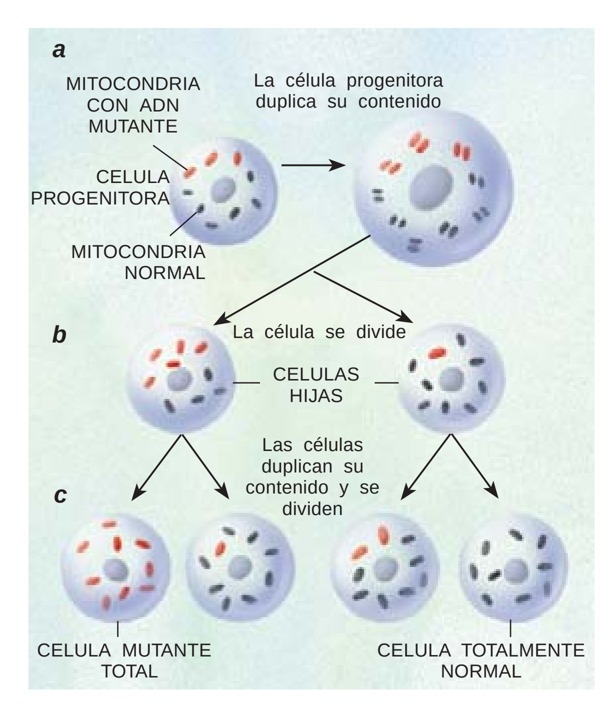
Las diferencias sintomatológicas de la familia en cuestión dependían, en buena medida, de las distintas proporciones de moléculas de ADN mitocondrial mutante en los tejidos de los pacientes. Los que presentaban una fracción mayor tenían más afectada la producción de ATP y la enfermedad se hallaba también más extendida.

Otras sustituciones de bases necesitan alcanzar la homoplasmia antes de tornarse problemáticas. Son las mutaciones que dan lugar a efectos más predecibles. Caen dentro de esta categoría los defectos genéticos que están en el trasfondo de la mayoría de los casos de la neuropatía óptica hereditaria de Leber. Esta enfermedad empieza a manifestarse en la edad adulta, cuando la región central del nervio óptico deja de funcionar, provocando la pérdida de la visión en el centro del campo visual. Tres mutaciones en el ADN mitocondrial, que afectan al transporte de electrones en los primeros eslabones de la cadena respiratoria, dan cuenta, en conjunto, del 90 por ciento de los casos registrados en todo el mundo. Los pacientes con dos mutaciones padecen por lo general una pérdida permanente de visión; los que sufren la tercera mutación recuperan a veces parte de la vista.

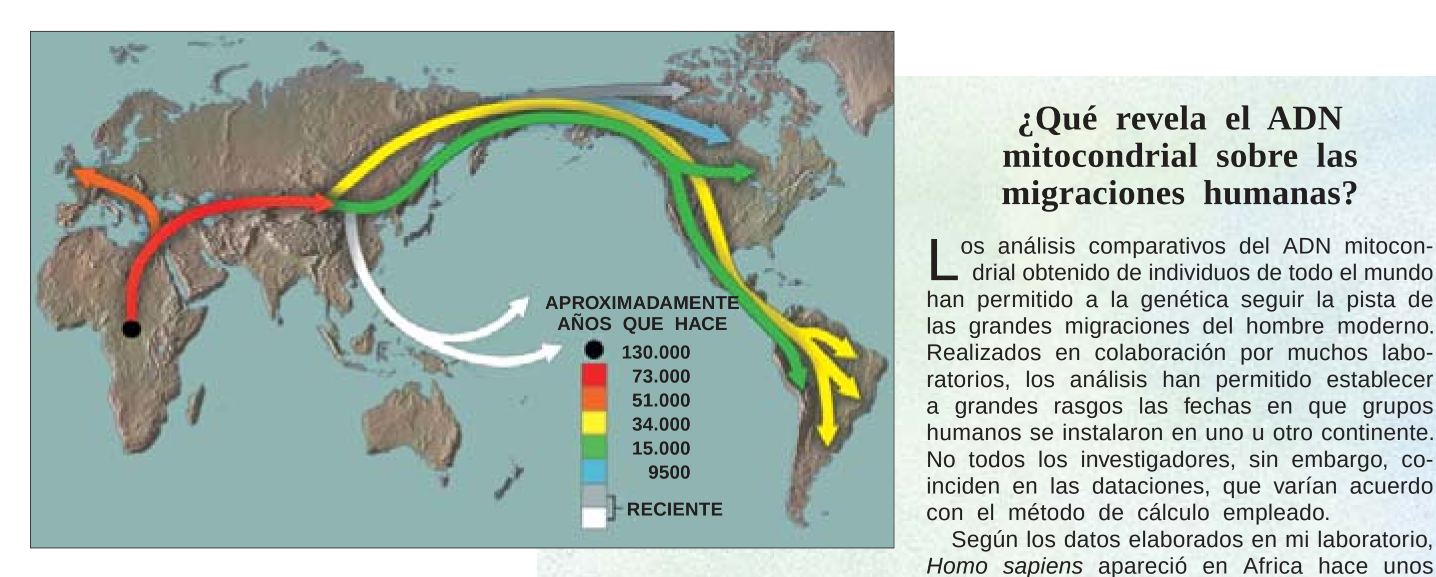
Algunas mutaciones patológicas de sustitución de bases de ADN mitocondrial trastocan la secuencia de las moléculas del ARN que forman parte de la maquinaria de síntesis de proteínas en las mitocondrias. Tales mutaciones pueden así entorpecer la síntesis de muchas proteínas diferentes y menoscabar la producción de ATP. Por ese motivo, quienes nacen con mutaciones que minan la síntesis proteica pueden presentar enfermedades polisistémicas graves, en las que a menudo se interesa el sistema nervioso central y se acompañan de trastornos musculares.

El caso mencionado en el comienzo del artículo —el del joven que murió a los 28 años por fallo renal e infección— refleja la letalidad potencial de las mutaciones que afectan a la síntesis de proteínas. Sucumbió a causa de una mutación puntual en la que se había producido la deleción de una base en un gen codificador de un molécula de ARN de transferencia. En condiciones de normalidad compete a esta molécula de ARN acarrear el aminoácido leucina hasta las proteínas que se están sintetizando en la mitocondria. La mutación se generó probablemente en las células de la línea germinal de la madre, porque las células ajenas a esa línea (células de la sangre) de la madre contenían sólo ADN mitocondrial normal.

Se ha comprobado, asimismo, que otras diez mutaciones que atañen a ese gen desencadenan numerosas y graves patologías. Tres tipos de mutaciones provocan miopatía mitocondrial, debilidad muscular progresiva que se caracteriza por la presencia de fibras rojas de aspecto raído: fibras musculares degeneradas y repletas de mitocondrias defectuosas con una morfología anómala que se tiñen de rojo con un colorante específico. Dos defectos genéticos arrastran un aumento y deterioro progresivo del miocardio (cardiomiopatía hipertrófica). Hay cinco mutaciones que afectan a múltiples sistemas; producen una gavilla de síntomas que se amparan bajo el nombre colectivo de MELAS (encefalopatía mitocondrial, acidosis láctica y episodios que la asemejan a una apoplejía). Cierta mutación inductora de MELAS causa también alrededor de un 1,5 por ciento de todos los casos de diabetes mellitus,



3. UNA CELULA que encierre mitocondrias con ADN mutante y mitocondrias con ADN normal (*a*) generará células hijas que se diferenciarán de ella y entre sí por el número de mitocondrias con el ADN alterado (*b*). Conforme se van reproduciendo, las poblaciones de ADN mitocondrial resultantes tenderán a alcanzar un cien por cien de ADN normal o un cien por cien de ADN mutante (*c*). Esta deriva o sesgo hacia la uniformidad es el que se produce en las células durante el desarrollo de un embrión. Pero se da también en los óvulos de sucesivas generaciones de hembras; por eso, algunos hijos acaban teniendo más ADN mutante, y síntomas más graves, que la madre.



¿Qué revela el ADN mitocondrial sobre las migraciones humanas?

Los análisis comparativos del ADN mitocondrial obtenido de individuos de todo el mundo han permitido a la genética seguir la pista de las grandes migraciones del hombre moderno. Realizados en colaboración por muchos laboratorios, los análisis han permitido establecer a grandes rasgos las fechas en que grupos humanos se instalaron en uno u otro continente. No todos los investigadores, sin embargo, coinciden en las dataciones, que varían acuerdo con el método de cálculo empleado.

Según los datos elaborados en mi laboratorio, *Homo sapiens* apareció en Africa hace unos 130.000 años. De allí emigró en un comienzo hacia Asia (*flecha roja en el mapa*), hace unos 73.000 años. Hace aproximadamente unos 51.000 años otro grupo habría colonizado Europa desde el Oriente Medio (*flecha de color naranja*).

Desde Asia, el hombre moderno habría llegado al Nuevo Mundo en diversas oleadas migratorias. Hace unos 34.000 años, grupos nómadas se habrían desplazado a través de Siberia y Alaska y después por América del Norte y Centroamérica hasta América del Sur (*flechas amarillas*). Estos fueron los antepasados de los modernos paleoíndios como los pimas de Arizona, los mayas de México y los yanomamis de Venezuela. Hace 15.000 años, una segunda oleada de emigrantes procedentes de Asia habrían rodeado Siberia, posiblemente buscando la costa antes de alcanzar Alaska y dispersarse por todas las regiones de América (*flechas verdes*). Se mezclaron allí con la población existente para dar lugar a los paleoíndios actuales de habla amerindia.

Hace alrededor de 9500 años, partieron de Siberia los fundadores de Nadéné, un grupo lingüístico que incluye las tribus atabascas del noroeste de

patología ésta que puede desencadenarse incluso en niveles bajos de la mutación.

Bastantes mutaciones del ADN mitocondrial heredadas que entorpecen la síntesis de las proteínas resultan letales en edades tempranas. Las hay, sin embargo, más moderadas, manifestándose sólo en edad avanzada. Se da ese caso en la mutación experimentada por un gen que codifica una molécula de ARN de transferencia que transporta el aminoácido glutamina; esta mutación se encuentra en un 5 por ciento de los europeos con enfermedad de Alzheimer de manifestación tardía.

También se han encontrado mutaciones del ADN mitocondrial que afectan a muchos genes a la vez; eso ocurre cuando se borran o duplican segmentos largos de material genético. Lo mismo que acontecía con las sustituciones de bases, las nuevas “reordenaciones” pueden inducir enfermedades de diversa gravedad.

Cambios de ADN al por mayor

Se han estudiado con especial intensidad dos trastornos debidos a estas mutaciones de redistribución, caracterizados por parálisis de los músculos del ojo y miopatía mitocondrial: una oftalmoplejía (que suele manifestarse después de haber cumplido la edad de 20 años) y el síndrome de Kearns-Sayre (que puede aparecer antes e incluir degeneración de la retina, alteraciones cardiacas, enanismo y otros síntomas diversos).

Las mutaciones de redistribución pueden hallarse detrás de muchos casos de síndrome de Pearson. Los niños que lo padecen, incapaces de producir células de la sangre, han de depender de las transfusiones desde una edad muy temprana; tienen también afectada la función pancreática. Si logran sobrevivir no se librarán de una parálisis ocular y otros problemas asociados con el síndrome de Kearns-Sayre. Por desgracia, los pacientes afectados con cualquiera de estas enfermedades se agravan con el paso del tiempo y en bastantes casos mueren por fallo respiratorio u otras disfunciones sistémicas.

Las células de los pacientes con cualquiera de estas patologías pueden contener una mezcla de moléculas de ADN mitocondrial, incluidos ADN con deleciones y otros con duplicaciones. Pero se esconde probablemente en las deleciones la razón por la que estas enfermedades revisten tamaña gravedad desde los comienzos. La pérdida de ADN arrastra consigo la de genes de moléculas de ARN de transferencia; por tanto, se sintetizarán de forma incorrecta proteínas necesarias para la producción de energía, si es que llegan a sintetizarse. Según parece, el empeoramiento característico de estas enfermedades con el transcurso del tiempo se debe, en parte, a que ciertos tejidos —músculos y otros constituidos por células que no se dividen— replican selectivamente ADN mitocondrial incompleto (delecionado).

No se sabe a ciencia cierta por qué el ADN mitocondrial delecionado se multiplica selectivamente en los tejidos que no se dividen. Se han propuesto dos hipótesis. De acuerdo con la primera, las moléculas con deleciones, al ser menores que las del ADN de los bucles normales, tardan menos en replicarse, lo que favorece su proliferación. La segunda hipótesis tiene que ver con la organización interna de las fibras musculares. Cada fibra está constituida por la integración de muchas células musculares y, por tanto, contiene múltiples núcleos. Cuando un núcleo detecta un déficit energético en su entorno (como el que se produce por genes mitocondriales mutantes), intenta entonces compensar esa limitación avivando la replicación de cualquier mitocondria que se encuentre cerca. Por desgracia, esta respuesta promueve precisamente la replicación de las propias mitocondrias causantes del déficit energético local, con lo que se agudiza el problema.

Canadá y Alaska (como los dogrib) y los apaches y navajos (*flecha azul*) del sudeste de los Estados Unidos. Las migraciones que llevaron a los esquimales y aleutianos a Norteamérica (*flecha gris*) y a los pueblos insulares al Pacífico (*flechas blancas*) acontecieron en fechas más recientes.

Gracias al análisis del ADN mitocondrial podemos reconstruir tales migraciones, porque, conforme las mujeres se trasladaron de un continente a otro, su ADN mitocondrial fue acumulando una tras otra mutaciones no patogénicas. Por consiguiente, las secuencias de pares de bases en el ADN mitocondrial en un continente adquirieron pautas distintivas; se fueron haciendo diferentes de las secuencias asentadas en otros continentes. Al agrupar las secuencias relacionadas de un continente en "haplogrupos", y comparando después los haplogrupos de los diversos continentes, podemos determinar el grado de parentesco de las mujeres de los distintos lugares. Del mismo modo puede deducirse qué países se colonizaron primero: la variación mayor en las secuencias del ADN mitocondrial en un continente refleja una mayor longevidad. Las poblaciones africanas son las más viejas, porque poseen el mayor grado de variación en su ADN mitocondrial. Los asiáticos, europeos y los aborígenes de América muestran progresivamente una variación menor.

El momento preciso en que se coloniza cada continente puede darse sólo como una aproximación, porque los datos dependen del ritmo con el que la molécula de ADN haya ido acumulando las mutaciones. Esta tasa es bastante constante, aunque se desconoce su precisión exacta. Las mutaciones parecen ocurrir una vez cada 2000 o 3000 años. Las fechas presentadas aquí suponen que el ritmo de mutación cae más o menos en medio de esos márgenes.

Además de revelar los patrones de las migraciones continentales, el análisis del ADN mitocondrial sugiere que los primeros individuos de la especie *H. sapiens* reemplazaron a especies humanas más primitivas (como la de Neanderthal) que encontraron en sus asentamientos. Esta conclusión, sin embargo, es disputada por algunos antropólogos, quienes sostienen que los predecesores del *H. sapiens* aparecieron en Africa hace más de un millón de años, para dispersarse por el Viejo Mundo, donde evolucionaron en distintas razas de *H. sapiens*.

—D.C.W.

El origen de las deleciones responsables de las enfermedades mitocondriales constituye una vieja cuestión desconcertante. Aun cuando las patologías aludidas pasen de una generación a otra, lo cierto es que los ADN mitocondriales delecionados no suelen heredarse: la célula o embrión que alojen principalmente ADN delecionado morirán. Parece, pues, que hay que mirar a otro lado, es decir, hacia las moléculas de ADN que contienen duplicaciones de genes. Estas moléculas portan todos los genes necesarios para la producción de energía y, por tanto, no tendrían por qué causar problemas directamente. Sin embargo, al poseer las moléculas duplicaciones internas, pueden sufrir procesos —de emparejamiento y recombinación interna quizá— cuyo resultado final son deleciones perturbadoras.

Los fallos del ADN mitocondrial heredados inducen a veces versiones prematuras de trastornos propios de edad avanzada, como la diabetes, sordera, miopatías, debilidad muscular, problemas motores y demencia. Se ha demostrado, además, que determinadas mutaciones del ADN mitocondrial provocan, en ocasiones, Alzheimer, distonía (una enfermedad progresiva del movimiento) y otras patologías neurodegenerativas. Estas secuencias de cuadros —sumadas al hecho de que varias enfermedades degenerativas que aparecen en la edad adulta se han vinculado con una disminución de la actividad de los complejos proteicos implicados en la producción de energía (lo propio de muchas enfermedades del ADN mitocondrial)—abonan la tesis siguiente: la reducción progresiva de la producción de energía (ATP) en el sistema nervioso, músculo u otros tejidos contribuye de manera destacada en el proceso de envejecimiento y en la instauración de enfermedades degenerativas relacionadas con la edad.

Envejecimiento y enfermedades relacionadas con la edad

Son varios los factores que determinan una caída, con la edad, de la producción de energía en las mitocondrias. Y ello incluso en personas que de entrada contaban con genes mitocondriales y nucleares sanos. Por mencionar un factor: la exposición continuada a determinadas toxinas del medio. Las toxinas más agresivas ejercen su efecto deletéreo mediante el bloqueo de las mitocondrias. Otro factor podría ser la acumulación progresiva, a lo largo de la vida, de mutaciones de ADN mitocondrial somáticas.

La teoría mitocondrial del envejecimiento sostiene que, al mismo tiempo que vivimos y producimos ATP, nuestras mitocondrias generan radicales libres de oxígeno que atacan el ADN mitocondrial. Esta acumulación aleatoria de mutaciones del ADN mitocondrial somáticas en personas que comenzaron su vida con genes mitocondriales sanos conduce, andando el tiempo, a un descenso de la producción de energía por debajo de niveles en uno o más tejidos. De este modo, las mutaciones somáticas y la inhibición de las funciones mitocondriales contribuirían a los signos habituales del envejecimiento normal, como la pérdida de memoria, oído, vista y demás achaques.

En aquellas personas cuya producción energética se encontraba resentida (por mutaciones mitocondriales o nucleares heredadas, por toxinas o por otros factores), las alteraciones del ADN mitocondrial somáticas resultantes no tardarían en rebajar más allá de lo deseable los niveles de producción de energía. Estos individuos son los que evidencian antes el daño y en ellos también la enfermedad se desarrolla más deprisa que en otros cuya capacidad de producción de energía no queda menoscabada desde un comienzo.

¿Hay pruebas de la caída de la producción de energía y del aumento de mutaciones del ADN mitocondrial somáticas conforme la persona va envejeciendo? Las hay. Se ha demostrado que la actividad de al menos uno de los complejos de la cadena respiratoria, y posiblemente otro, cae con la edad en el cerebro, músculo esquelético, corazón e hígado. Con la edad menudean determinadas mutaciones de redistribución del ADN mitocondrial en muchos tejidos; sobre todo, en el cerebro y, de modo particular, en las regiones que controlan la memoria y el movimiento. Y con la edad se acumulan mutaciones de redistribución del ADN mitocondrial del músculo esquelético, miocardio, piel y otros tejidos. Podrían agregarse, asimismo, ciertas mutaciones por substitución de bases que se han relacionado con enfermedades heredadas del ADN mitocondrial.

Todos estos datos ayudan a explicar por qué escasean las mutaciones que alcanzan niveles detectables antes de los 30 o 40 años y, sin embargo, crecen exponencialmente a partir de entonces. Los estudios sobre el envejecimiento del músculo atribuyen parte de este aumento a una multiplicación selectiva del ADN mitocondrial que haya perdido por deleción algunos segmentos.

Argumentos a favor

El análisis de tejidos extraídos de pacientes con enfermedades neurológicas y musculares degenerativas crónicas apoya la hipótesis según la cual algunas patologías de éstas tendrían su raíz en la acumulación de mutaciones somáticas. Los que sufren la enfermedad de Huntington pierden el control de la actividad motora y presentan demencia con el paso de los años como resultado de una mutación heredada específica en su ADN nuclear. Pero muestran también niveles de deleciones de ADN mitocondrial en el cerebro superiores a los habituales en individuos sanos de su misma edad; este fenómeno revela que el ritmo de aparición de mutaciones mitocondriales somáticas es elevado. La mutación nuclear y las mutaciones mitocondriales somáticas podrían combinarse para rebajar la producción de energía en las células del cerebro y producir los síntomas de la edad adulta.

Ciertos casos de enfermedad de Alzheimer, lo dije antes, se han atribuido a mutaciones congénitas del ADN mitocondrial. Ahora bien, el hecho de que las mutaciones en cuestión no produzcan de inmediato los síntomas podría significar que no basten por sí solas para provocar la enfermedad. El nexo necesario podría hallarse de nuevo en las mutaciones mitocondriales adquiridas, que añadirían sus efectos a las mutaciones heredadas. Vale la pena resaltar que el tejido cerebral de los pacientes de Alzheimer presenta niveles altísimos de cambios del ADN mitocondrial somáticos.

Pudiera ser que una fracción significativa de la diabetes mellitus de tipo II (del adulto), que afecta a millones de personas de más de 40 años, tuviera su origen en defectos congénitos del ADN mitocondrial que no conocemos todavía. Los afectados por este tipo de diabetes segregan insulina en sangre, aunque no en la cuantía suficiente para las necesidades del organismo. La diabetes es una patología de distribución familiar; a menudo, la afectada es la madre, como cabría esperar de una herencia ligada al ADN mitocondrial. Se ha demostrado, además, que las mutaciones de redistribución pueden en ocasiones causar diabetes de tipo II. Parece, pues, razonable pensar que otras mutaciones ejerzan el mismo efecto. Así, un mecanismo plausible de la aparición de la diabetes sería el siguiente: mermada la síntesis de ATP, las mutaciones del ADN mitocondrial privarían, a las células productoras de insulina, de la energía que necesitan para segregar adecuadamente la hormona en sangre.

Reviste parejo interés la hipótesis que propone que el fallo cardiaco que afecta a pacientes con aterosclerosis se acelera por el desarrollo de mutaciones somáticas en el ADN mitocondrial. A medida que la placa aterosclerótica ocluye las arterias, pueden éstas cerrarse de forma transitoria y bloquear el flujo de sangre hasta el corazón, empobreciéndose el suministro de oxígeno al miocardio; se produce lo que se llama una isquemia. Sin oxígeno, la cadena respiratoria cesa de funcionar, para emitir solamente descargas de radicales libres de oxígeno cuando retornan el flujo de sangre y el oxígeno (reperfusión). Estas descargas podrían afectar al ADN mitocondrial del miocardio y limitar el ATP necesario para la contracción. Respaldan este planteamiento los pacientes cuyo corazón se ha dilatado por isquemia crónica y reperfusión, quienes presentan un grado elevado de alteraciones del ADN mitocondrial.

Las investigaciones acometidas con roedores alimentan la sospecha de que una acumulación acelerada de mutaciones de ADN mitocondrial puede precipitar el envejecimiento. Los animales mantenidos con dietas restringidas se conservan sanos y viven más tiempo que sus congéneres sin ningún control de la alimentación. Los animales longevos mantenidos a dieta producen menos radicales libres de oxígeno y preservan un ADN mitocondrial más libre de alteraciones, que, en cambio acumulan sus hermanos de camada cebados sin restricción.

¿Qué hay que hacer?

Si los radicales libres son los responsables de la acumulación de mutaciones del ADN mitocondrial somáticas y con ello condicionan la pauta del envejecimiento, entonces el tratamiento que bloquee su producción intramitocondrial protegerá contra las alteraciones del ADN mitocondrial. Dicha protección contribuiría a frenar el envejecimiento y retrasar el inicio de enfermedades relacionadas con la edad. El tratamiento en cuestión podría consistir en el uso, a lo largo de toda la vida, de antioxidantes (coenzima Q o vitaminas C o E). Los trabajos preliminares con animales permiten abrigar esperanzas en esa dirección.

Para frenar el paso del envejecimiento podría también optarse por poner coto a la multiplicación de las moléculas mutadas de ADN mitocondrial en el músculo u otros tejidos. Para lograrlo, es preciso conocer de antemano, y por ahí va la investigación, las interacciones moleculares a través de las cuales los núcleos detectan la caída de energía local y estimulan la reproducción de mitocondrias aberrantes en su entorno.

Hace apenas una década nadie sospechaba la implicación de las mutaciones del ADN mitocondrial en trastornos desconcertante, en el envejecimiento y en múltiples enfermedades degenerativas crónicas. Hoy, el estudio de ese ADN cosecha sin cesar nuevas pistas para ahondar en las causas y el desarrollo de muchas patologías; y, mejor aún, sugiere tratamientos plausibles de las mismas y formas de prevenir su progresivo agravamiento. Si se demuestra que las hipótesis sobre el papel de las mutaciones del ADN mitocondrial en el envejecimiento y en la enfermedad son acertadas, la biología de las mitocondrias pasará a ocupar un lugar central en la lucha contra el sufrimiento humano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MITOCHONDRIAL DNA VARIATION IN HUMAN EVOLUTION: 1994 WILLIAM ALLAN AWARD ADDRESS. D. C. Wallace en *American Journal of Human Genetics*, vol. 57, n.º 2, páginas 201-223; agosto de 1995.

MITOCHONDRIAL GENETICS. D. C. Wallace, M. D. Brown y M. T. Lott en *Emery and Rimoin's Principles and Practice of Medical Genetics*. Tercera edición. Dirigido por David L. Rimoin y cols. Churchill Livingstone, 1997.

MITOMAP: HUMAN MITOCHONDRIAL GENOME DATABASE, 1995-1997. Center for Molecular Medicine, Emory University, Atlanta, Ga. Disponible en Internet en la dirección http: //www.gen.emory.edu/mitomap.html

Control de rayos mediante láser

Para domeñar la naturaleza, nada mejor que imitar su acción. Para obviar los catastróficos efectos de los rayos, nada mejor que encauzar su trayectoria mediante láseres especiales

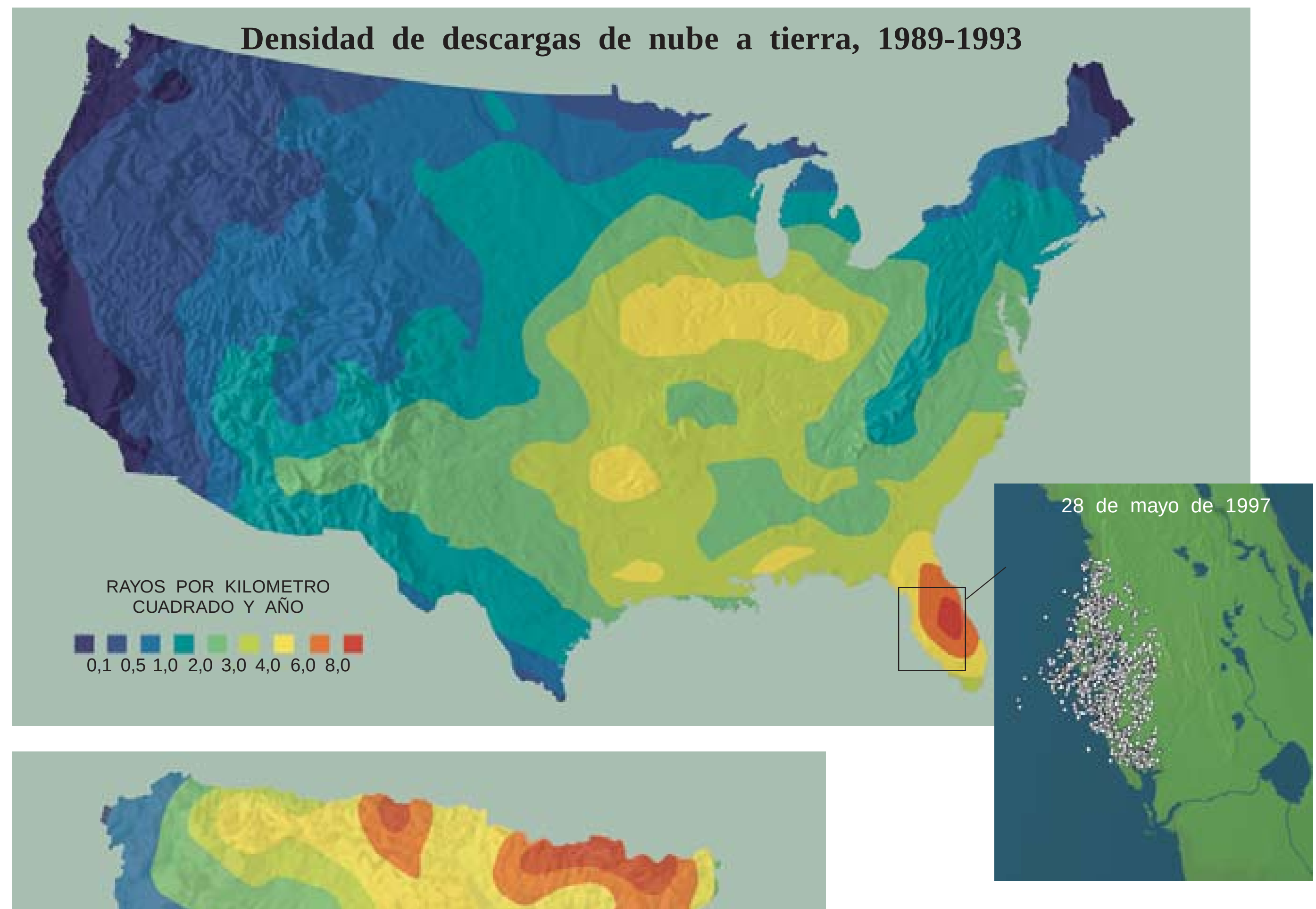
Jean-Claude Diels, Ralph Bernstein, Karl E. Stahlkopf y Xin Miao Zhao



Pese a siglos de observación científica —incluido el famoso experimento de Benjamín Franklin con una cometa— el rayo continúa envuelto en un extraño misterio. Desde los tiempos del físico norteamericano se sabía que las cargas eléctricas pueden ir acumulándose poco a poco en las nubes para crear luego brillantes relámpagos cuando, de forma brusca, se descarga la energía almacenada. Pero no acababan de entenderse los mecanismos físicos que subyacían bajo ese fenómeno. ¿Con qué velocidad viajaban los rayos? ¿A qué obedecía la trayectoria que tomaba la energía? ¿Qué ocurría con la descarga eléctrica después de penetrar en el suelo? Tales preguntas terminaron por convertirse en problemas sometidos a inquisición científica. La investigación empeñada ha dilatado nuestro conocimiento fundamental de los rayos y ha planteado la posibilidad de ejercer control sobre el punto donde cae el rayo.

Aunque la descarga es de suyo errática, el efecto total producido resulta sobrecogedor. Cada año, sólo en los EE.UU. (donde unos 20 millones de descargas individuales llegan al suelo), los rayos matan varios centenares de personas y causan daños de consideración, empezando por los incendios forestales. A la acción de los rayos hay que atribuir la mitad de los cortes de corriente eléctrica en regiones propensas a las tormentas, lo que cuesta a las compañías eléctricas de aquel país hasta un millardo anual de dólares en reparaciones de equipo y pérdida de ingresos. Los rayos pueden también desajustar o inutilizar los instrumentos de navegación de los aviones comerciales (e incluso de los cohetes en su vuelo hacia el espacio). Que se sepa, además, ocasionaron un daño grave en el funcionamiento de cierto reactor nuclear.

1. LOS RAYOS destellan entre las nubes y el suelo cuando el aire, un aislante eléctrico, se ioniza y se hace conductor. Esta exposición prolongada muestra múltiples rayos sobre Tucson, en el estado de Arizona.



2. LA RED NACIONAL de detección de rayos, ahora dirigida por Global Atmospherics de Tucson, vigila la actividad tormentosa en los Estados Unidos, nación donde la densidad de relámpagos y rayos varía enormemente (*arriba*). Siguiendo la pista al instante y la dirección de los impulsos electromagnéticos producidos por los rayos, esta red de sensores identifica la posición de las descargas y estima su magnitud. (Francisco Pérez Puebla ha elaborado el mapa correspondiente a la densidad de descarga para España y Portugal.) El recuadro de la derecha muestra las cuantiosas descargas que afectaron a Florida occidental durante una tormenta de primavera.

No es de extrañar, pues, que se haya buscado la forma de impedir que los rayos acarreen tales perjuicios. De momento, científicos e ingenieros sólo han obtenido éxitos moderados en las soluciones que han aportado. A menudo podemos prevenir los peores desastres instalando en los edificios pararrayos conectados a tierra, lo que sugiriera Franklin tras recoger su cometa experimental en 1752. Aunque creyó en un principio que tales varillas terminadas en punta daban buen resultado porque "el fuego eléctrico... se extraería de la nube silenciosamente, antes de que pudiera acercarse lo suficiente para descargar", más tarde Franklin se dio cuenta de que tales aparatos canalizaban la descarga o dirigían el rayo a otra parte. Este mismo principio —desviar la descarga en lugar de tratar de evitarla— proporciona la base de los métodos de protección que hoy se emplean (supresores de descargas o apantallamiento conectado a tierra). En esa regla bebemos nosotros en nuestro empeño por controlar los rayos mediante láser.

Acotación del problema

A finales de los años setenta, los físicos de la Universidad de Nueva York en Albany establecieron una red de antenas para seguir la pista a las descargas de nube a tierra en una zona restringida de dicho estado. En los años siguientes, aquella red de detectores especializados en la dirección se extendió hacia otros

JEAN-CLAUDE DIELS, RALPH BERNSTEIN, KARL E. STAHLKOPF y XIN MIAO ZHAO partieron de supuestos muy distintos para converger en un mismo afán, la desviación de las trayectorias de los rayos. Diels, profesor del departamento de física y astronomía de la Universidad de Nuevo México, y Zhao, investigador del Laboratorio Nacional de Los Alamos, empezaron a trabajar juntos en el campo de los láseres de pulsos ultrarrápidos en 1990; no tardaron en descubrir la posibilidad de usar tales aparatos para controlar los rayos. Tras dos años de investigación obtuvieron una patente para su invento. Bernstein, director de proyectos del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica, y Stahlkopf, su asociado, son expertos ingenieros electricistas formados, respectivamente, en la Universidad neoyorquina de Syracuse y en la de California en Berkeley. Han puesto todo su empeño en la detección de rayos, experimentos sobre rayos provocados mediante cohetes y control de rayos por láser.



3. LAS FULGURITAS se forman cuando el rayo penetra en el suelo y funde el terreno arenoso en su camino. Este ejemplo muestra cómo un rayo ha alcanzado un cable eléctrico subterráneo (que antes del accidente se creía estar seguro enterrado a un metro bajo la superficie).

estados. Hasta que en 1991 (cuando empezaron las aplicaciones comerciales), el grupo de antenas podía detectar la aparición de rayos en cualquier parte del país.

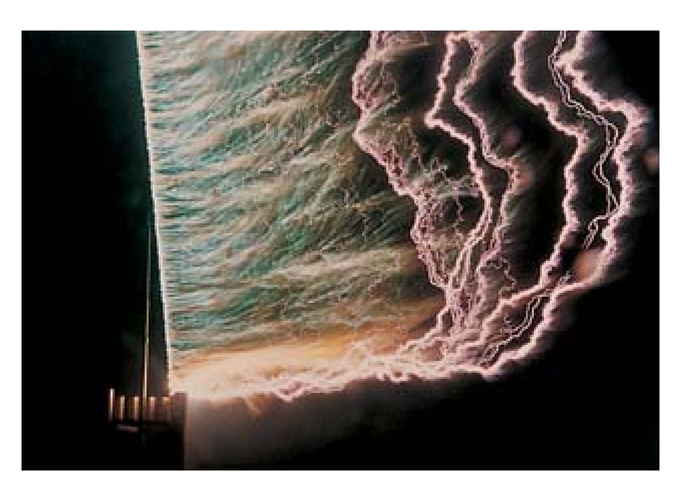
La actual Red Nacional de Detección de Rayos, en que terminó convertido aquel embrión neoyorquino, consta de unas 100 estaciones que vigilan los relámpagos y determinan el instante exacto y la dirección de las explosiones de energía electromagnética producidas por tales descargas. Las estaciones remiten sus copiosas mediciones, vía satélite, a un centro de control instalado en Tucson. Hay en ese centro de Arizona un ordenador que procesa la información recibida y redistribuye sin cesar informes acerca de la actividad tormentosa. Cientos de abonados se benefician de sus servicios: compañías eléctricas, líneas aéreas e incluso el Mando Aéreo Estratégico de los EE.UU. Según reconocen, las eléctricas consiguen ahorrar más de medio millón de dólares al año con una información que les permite enviar de inmediato cuadrillas de reparaciones hacia los puntos sensibles o donde los rayos han averiado ya las líneas. Pero los encargados de vigilar instalaciones muy delicadas —centrales nucleares y subestaciones eléctricas— desearían métodos más elaborados de prevención para reducir la amenaza del rayo.

Para salir al paso de esa exigencia se trabaja en un laboratorio de campo muy particular cerca de Starke, Florida. En 1993, dos de los autores (Bernstein y Stahlkopf), junto con otros miembros del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica de Palo Alto, California, se pusieron de acuerdo con Power Technologies de Schenectady, Nueva York, para construir una instalación especial en la base de la Guardia Nacional de Florida en Camp Blanding; en ella se sometería a prueba la susceptibilidad a la acción de los rayos mostrada por diversas estructuras, estuvieran enterradas o se levantaran sobre el suelo. No se espera a que caiga un rayo al azar; antes bien, los investigadores que trabajan en sus instalaciones (hoy bajo la supervisión de la Universidad de Florida) provocan la formación de un rayo mediante cohetes que arrastran una cola constituida por un fino alambre unido a tierra.

A diferencia de tales descargas provocadas, la descarga natural del rayo comienza con un precursor casi invisible o fase inicial. Esta descarga guía, así se llama, se propaga, en dirección descendente, de la nube al suelo; lo hace en una secuencia de







4. COHETES que se usan para provocar rayos en varios experimentos de campo. El proyectil construido (*izquierda*) lleva en su base un carrete de alambre conectado al suelo, que se desenrolla en vuelo (*centro*). La primera descarga provocada sigue este filamento de cobre y crea un canal conductor de aire ionizado; las descargas ulteriores del mismo rayo (que pueden producirse repetidamente dentro de una fracción de segundo) viajan a lo largo de caminos crecientemente tortuosos conforme el viento deforma el canal conductor (*derecha*).



5. LA DESVIACION DE LOS RAYOS POR EL LASER podría tomar diferentes formas. Los ingenieros imaginaron en un principio que, con potentes láseres de infrarrojos, podría crearse un camino conductor en el cielo; pero esos haces ionizan el aire frontal, que se vuelve entonces opaco y difunde la luz (*a*). En el Japón se está experimentando con haces múltiples; se enfocan mediante espejos para formar una línea de bolsas ionizadas que ayudan a canalizar la descarga (*b*). El método de los autores se basa en dos haces láser acoplados, uno ultravioleta y el otro visible (apuntados hacia arriba mediante un espejo único) que deben crear un camino recto de ionización por donde transite el rayo (*c*). Unas barras conectadas a tierra interrumpirían el rayo resultante, protegiendo el espejo y el aparato de láser. También se podría disponer el haz de modo que al dirigirse hacia arriba rozase un mástil conectado a tierra.

pasos, en que arranca electrones de las moléculas de los gases atmosféricos a lo largo de su trayectoria y crea un canal de aire ionizado que después sirve como canal conductor eléctrico. En cuanto la descarga guía entra en contacto con el suelo, se produce la "fase de retorno", brillante y energética. Igual que ocurría con la descarga guía, la descarga de retorno, constituida por corrientes que varían desde algunos miles hasta 300.000 ampères (en la instalación eléctrica de una casa no se superan las decenas de ampères), obedece a la ingente diferencia de potencial —cientos de millones de volts— entre el suelo y la nube tormentosa.

El rayo viaja a velocidades próximas a la mitad de la lumínica. Transporta tanta corriente eléctrica, que destruye fácilmente cualquier objeto que se encuentre en su camino.

Cómo esquivar la catástrofe

De igual manera que los cohetes unidos a tierra por alambre representan una versión moderna del experimento de la cometa de Franklin, en un futuro no lejano los haces láser podrían servir de pararrayos avanzados; ofrecerán un medio de refinada técnica para desviar los rayos alejándolos de puntos críticos donde podrían producir graves daños. Hace años se pensó ya en el empleo del láser para provocar la aparición de rayos creando un canal eléctricamente conductor de aire ionizado. Pero fracasaron los ensayos, algunos de los cuales se realizaron con los prototipos de láser más intensos disponibles. Ocurría que los láseres ionizaban de forma tan exhaustiva el aire, que lo hacían opaco al haz, el cual no podía penetrar más allá.

Dos grupos japoneses se han esforzado por vencer esa dificultad mediante la aplicación de potentes láseres infrarrojos. En vez de proponerse crear un canal continuo de partículas ionizadas, han ideado un método para enfocar uno o varios haces láser en puntos sucesivamente separados, de suerte que se genera una línea de puntos de burbujas de plasma, situadas a intervalos en la trayectoria que se pretende siga el rayo. En ensayos de laboratorio han obtenido ya una descarga controlada de más de siete metros de longitud. Pero sólo se garantiza el éxito con campos eléctricos de extremada intensidad, cuando el aire se halla próximo al punto en que se hace conductor de manera espontánea.

Diels y Zhao, coautores de este artículo, han optado por otro método, en el que se recurre a luz ultravioleta de un láser de energía bastante baja.

Nadie apostaría, a primera vista, por una técnica así. Los haces en cuestión carecen de una eficacia sobrada para ionizar las moléculas de aire en su camino; los pocos electrones (negativamente cargados) que la luz ultravioleta arranca se combinan rápidamente con las moléculas neutras de oxígeno vecinas, formando iones negativos de oxígeno que reducen la conductividad en el canal.

Sin embargo, la técnica de Diels y Zhao puede producir una ionización uniforme a lo largo de una trayectoria recta. La extensa línea ionizada actúa a manera de pararrayos, pues concentra el campo eléctrico tan intensamente en su punta, que el aire frontal se hace conductor, aumentando la longitud del canal.

Hemos hallado también que, enfocando un segundo haz láser de luz visible en la dirección del haz ultravioleta, contrarrestamos la tendencia de los electrones libres a unirse a las moléculas neutras de oxígeno para formar iones oxígeno negativos. Esta táctica da resultado porque los fotones del haz de láser de luz visible acarrean energía suficiente para liberar electrones arrancándolos de los iones negativos.

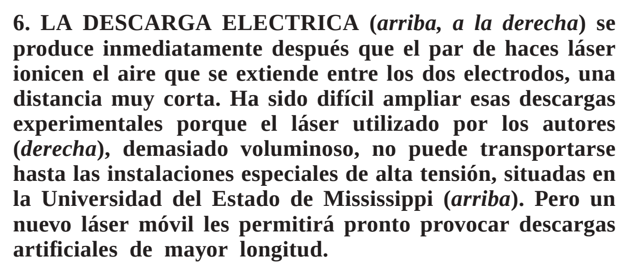
Aunque el láser de luz ultravioleta que hemos sometido a prueba funciona con niveles de potencia bajos, ioniza el aire sorprendentemente bien. La clave estriba en emplear pulsos de láser brevísimos. La corta duración de esos destellos (menos de una billonésima de segundo) posibilita que la luz láser tenga una intensidad máxima extremadamente alta, aunque la potencia media consumida por el aparato sea muy modesta. Podemos incluso apoyarnos en la física de la propagación del láser en el aire para imponer una forma particular a los destellos emitidos por el láser. Los pulsos tenderán a comprimirse conforme se propaguen por la atmósfera. Las altas energías comprimidas en estos paquetes de luz compactos compensarán la energía perdida en el camino debido a la difusión y la absorción.

No nos hemos decidido todavía a provocar rayos siguiendo ese método. Lo que no empece que la coherencia de nuestros cálculos teóricos con las simulaciones numéricas y los experimentos de laboratorio en pequeña escala nos indique que nos hallamos en la senda acertada. A este respecto, hemos empleado breves pulsos de láser de luz ultravioleta para crear un canal conductor entre dos electrodos altamente cargados y separados por 25 centímetros. Los láseres provocan una descarga eléctrica cuando la diferencia de potencial entre los electrodos es menos de la mitad de la que se requiere para que el aire se haga espontáneamente conductor. Dicho de otro modo: podemos inducir en el laboratorio la aparición de un rayo a lo largo de un canal mucho antes del punto en que se produciría la descarga espontánea.









6. LA DESCARGA ELECTRICA (*arriba, a la derecha*) se produce inmediatamente después que el par de haces láser ionicen el aire que se extiende entre los dos electrodos, una distancia muy corta. Ha sido difícil ampliar esas descargas experimentales porque el láser utilizado por los autores (*derecha*), demasiado voluminoso, no puede transportarse hasta las instalaciones especiales de alta tensión, situadas en la Universidad del Estado de Mississippi (*arriba*). Pero un nuevo láser móvil les permitirá pronto provocar descargas artificiales de mayor longitud.

Pruebas de campo

Con ayuda de Patrick Rambo, de la Universidad de Nuevo México, hemos construido un láser ultravioleta cuya potencia centuplica los hasta ahora ensayados. Nuestra idea es encender el láser diez veces por segundo durante una tormenta. Aunque estamos impacientes por conocer la eficacia de ese ingenio, habrá que realizar antes las pertinentes pruebas preliminares, que requieren una instalación especial de alta tensión.

Es una pena que nuestro láser sea delicado en extremo y poco manejable para transportarlo a través del país. Por eso confiamos en la terminación de un láser ultravioleta móvil, que (acoplado a un láser de luz visible idóneo) debería poder provocar descargas de laboratorio de muchos metros de longitud. Tal vez el mismo par de láseres acabe por ofrecer los medios para provocar descargas desde las nubes: una hazaña que hasta ahora no han logrado competidores nuestros que trabajan con otras clases de láseres.

Si, por fin, alguna técnica reseñada logra desencadenar la descarga de rayos por láser, la aplicación podría convertirse en fenómeno habitual. Los láseres podrían explorar el cielo por encima de las centrales nucleares, aeropuertos y centros de lanzamiento de vehículos espaciales. Por su parte, las compañías eléctricas, con su creciente red de distribución en peligro, podrían adquirir los medios para actuar de inmediato ante la amenaza de una tormenta inicial, en vez de reaccionar una vez que se ha producido ya el daño.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW LASERS MIGHT CONTROL LIGHTNING STRIKES. Xin Miao Zhao y J.-C. Diels en *Laser Focus World*, vol. 29, n.º 11, págs. 113-116; noviembre 1993.

FEMTOSECOND ULTRAVIOLET LASER PULSE INDUCED LIGHTNING DISCHARGES IN GASES. Xin Miao Zhao, Jean-Claude Diels, Cai Yi Wang y Juan M. Elizondo en *IEEE Journal of Quantum Electronics*, volumen 31, n.º 3, págs. 599-612; marzo 1995.

LIGHTNING DETECTION NETWORK AVERTS DAMAGE AND SPEEDS RESTORATION. R. Bernstein, R. Samm, K. Cummins, R. Pyle y J. Tuel en *IEEE Computer Applications in Power*, volumen 9, n.º 2, páginas 12-17; abril 1996.

Resplandores entre la Tierra y el espacio

Por encima de las tormentas eléctricas se desarrolla una actividad eléctrica de peculiar variedad

Stephen B. Mende, Davis D. Sentman y Eugene M. Wescott

LOS ESPECTROS son destellos luminosos que tienen lugar a gran altura, muy por encima de las tormentas, en la mesosfera. Los espectros son fenómenos raros, pero ciertas tormentas los engendran con frecuencia. De ordinario, la parte superior de las nubes está cargada positivamente y la inferior, negativamente. En el rayo, lo normal es que la base de la nube, negativa, se descargue hacia el suelo. Sin embargo, en ocasiones la parte superior, positiva, se descarga directamente a tierra, produciendo un chispazo de intensidad excepcional. Más o menos uno de cada 20 de estos rayos que saltan de la parte positiva de la nube a tierra posee tanta energía, que engendra espectros. Estos ejemplos se han coloreado de acuerdo con una imagen en color obtenida desde un avión.

Los rayos, con su fulgor y su potencia, han fascinado y amedrentado por igual a los humanos desde la antigüedad. En la Grecia clásica, por ejemplo, asociaban el rayo a Zeus tonante, su dios más poderoso. Y en tiempos modernos, comprendida ya la naturaleza eléctrica del rayo, persistieron ciertos misterios. Muchos fueron los observadores que han descrito juegos de luces fluctuantes que se filtran a través de los niveles más altos del cielo nocturno. Las auroras boreales, o ciertas nubes caprichosamente iluminadas, podían dar explicación para algunas de estas curiosidades; otras eran más desconcertantes. En particular, durante los vuelos nocturnos, los pilotos observan a veces extraños destellos sobre las tormentas. Pero la comunidad científica, en su mayor parte, tenía por apócrifos estos informes, hasta 1990, cuando John R. Winckler y sus colegas de la Universidad de Minnesota captaron una de estas enigmáticas visiones con una cámara de vídeo. Sus imágenes revelaron relampagueos y fulgores de configuración absolutamente nueva.

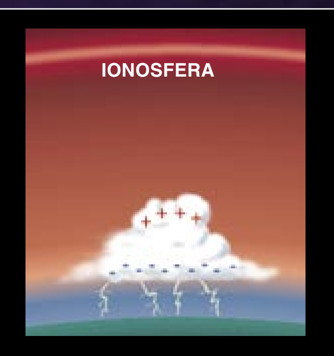
La proeza de Winckler suscitó una agitada actividad tendente a documentar estos fenómenos eléctricos de las capas altas, plasmada, desde aquella fecha, en cientos de observaciones similares, efectuadas desde la lanzadera espacial, aeronaves o desde el suelo. Con ello va quedando progresivamente claro que los fenómenos luminoeléctricos no se limitan a las capas de la atmósfera inferior que se encuentran emparedadas entre la borrasca y el suelo. Se sabe que se están produciendo regularmente descargas eléctricas en el aire enrarecido, por encima de los cúmulonimbos, hasta alturas de 90 kilómetros.

Llama la atención que estos fenómenos, muchos de ellos apreciables a simple vista, hayan estado por descubrir durante tanto tiempo. En retrospectiva, la existencia de algún tipo de relampagueo en las alturas de la atmósfera no tendría que haber causado sorpresa a los científicos. Hace mucho que se sabe que a gran altitud, muy por encima de los niveles turbulentos de la atmósfera, los rayos ultravioleta procedentes del sol impactan en las moléculas de gas, arrancándoles electrones. Este proceso crea la ionosfera, una capa conductora que circunda la Tierra. Pueden existir grandes diferencias de potencial eléctrico entre la ionosfera y las nubes de tormenta, como existen entre las nubes y el suelo. Impelido por tan enormes diferencias de potencial, el rayo puede invadir cualquiera de ambas zonas cuando el aire, en condiciones normales un aislante, alcanza el punto de ruptura eléctrica y abre senderos de conducción para la corriente.

Dado que la atmósfera se hace menos densa al aumentar la altitud, en los relámpagos generados a grandes alturas participan menor número de moléculas de los gases del aire, y se producen colores no observables en las descargas típicas. Presentan aspecto rojizo y son apenas visibles. Se han de utilizar cámaras de vídeo muy sensibles para registrar estos sucesos contra el telón de fondo del oscuro cielo nocturno. La debilidad de la luz emitida y la naturaleza transitoria de tales emisiones plantean, combinadas, graves problemas técnicos.

Dos de los autores (Sentman y Wescott) han promovido campañas de investigación con aviones a reacción especialmente preparados. Nosotros tres (y muchos otros) hemos estudiado también desde el suelo la actividad eléctrica a grandes altitudes. Todos los años, por ejemplo, nos reunimos por invitación de Walter A. Lyons, de ASTeR, e instalamos nuestros equipos en el laboratorio del patio de su casa, un emplazamiento que permite ver sin obstáculos las tormentas eléctricas de los Grandes Llanos estadounidenses. Umran S. Inan y sus colegas de la Universidad de Stanford han registrado asimismo ondas de radio de baja frecuencia desde la casa de Lyons, y han contribuido con sus mediciones a la formulación de modelos teóricos.

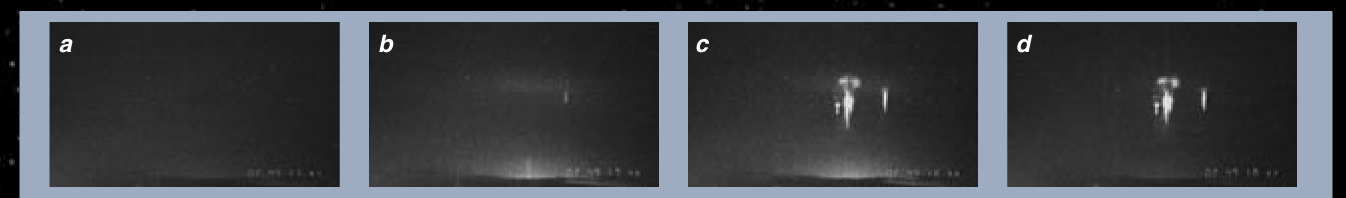
Los recién descubiertos fenómenos eléctricos de la atmósfera superior se encuadran en cuatro categorías. Dos tipos de resplandor en los niveles altos, los llamados espectros y elfos, son manifestaciones ya conocidas de la física atmosférica. La causa de las otras dos variedades, los chorros azules y los sucesos de rayos gamma, permanece en campos más especulativos. Nuestro grupo de investigación, y muchos otros de todo el mundo, se encuentra aún acopiando observaciones, con la esperanza de descifrar también los mecanismos físicos que rigen esta extraña fenomenología. Hasta ese momento, habremos de consentir que la visión de estos curiosos estallidos de energía, en su danza por el mundo etéreo que media entre el suelo y el espacio, suscite en nosotros el mismo sentir de asombro y reverente temor que en los antiguos.



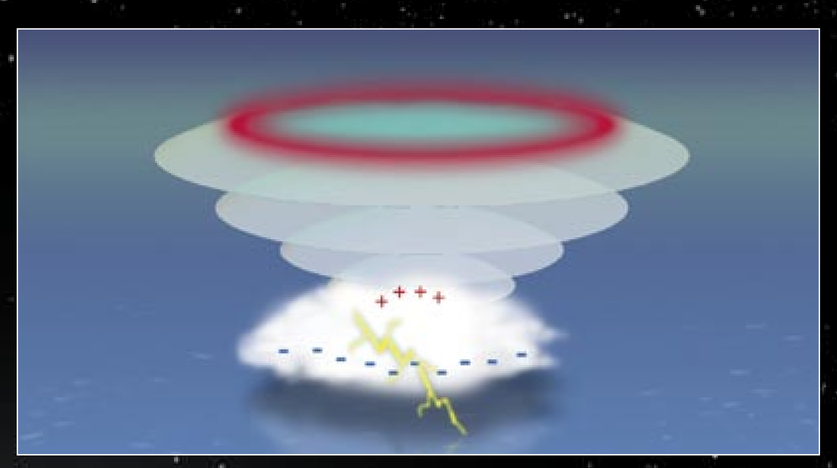




EL RAYO *(izquierda)* suele llevar cargas negativas desde la base de una nube hasta tierra. En ocasiones, potentes descargas *(centro)* pueden ser causa de que la carga positiva que se había ido acumulando cerca de la cima de la nube desaparezca de repente. El gran campo eléctrico (*gradación en color*) creado entre la cima de la nube y la ionosfera arrastra a los electrones hacia lo alto, y éstos colisionan con moléculas de gas. Si el campo eléctrico es suficientemente intenso y el aire está lo suficientemente enrarecido, los electrones se acelerarán sin obstáculos y alcanzarán la velocidad necesaria para transferir su energía cinética a la estructura electrónica de las moléculas con las que chocan, llevando tales moléculas a un "estado excitado". Las moléculas excitadas ceden su energía recién adquirida mediante la emisión de luz, originando espectros *(derecha)*. Los espectros se extienden desde unos 50 hasta unos 90 kilómetros de altitud.



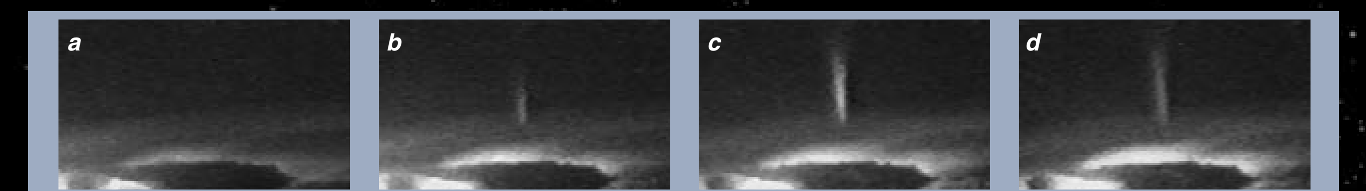
LOS ELFOS constituyen manifestaciones a gran altitud de los campos eléctricos creados por rayos de excepcional intensidad. Son visibles en forma de estratos brillantes, similares a hojuelas *(abajo, a la derecha, coloreados para darles su aspecto más verosímil)*. Los elfos pueden presentarse acompañados de espectros, aunque se forman antes y su duración es menor. La secuencia de imágenes de vídeo *(arriba)* ofrece el desarrollo cronológica de unos y otros: justo antes de la descarga del rayo normal, el cielo presenta una oscuridad uniforme *(a)*. El relámpago consiguiente ilumina la capa de nubes y genera enseguida el resplandor aplanado de los elfos en lo alto de la mesosfera *(b)*. Aparecen efímeras erupciones de espectros por toda esta región de la atmósfera, que suman su fulgor a la débil luz procedente la capa luminosa *(c)*. Por último, tan sólo persisten los espectros *(d)*.





LOS IMPULSOS ELECTROMAGNETICOS emitidos por fuertes descargas en el rayo crean elfos. Tales impulsos, que son, en esencia, fuertes estallidos de radioestática, se propagan desde el rayo a la velocidad de la luz en todas direcciones. Cuando la fracción de impulso dirigida hacia lo alto *(casquetes esféricos)* alcanza una altura crítica en la atmósfera (entre 75 y 100 kilómetros), el campo eléctrico asociado acelera los electrones. Estos impactan contra las moléculas del aire, llevándolas a estados excitados, con emisión de luz. En virtud de ese mecanismo se generan anillos luminosos que se expanden a lo largo de la intersección del impulso esférico con la capa crítica. La intersección se ensancha tan rápidamente (de hecho, a mayor velocidad que la luz), que estos anillos en expansión ofrecen el aspecto de discos aplanados.

STEPHEN B. MENDE, DAVIS D. SENTMAN y EUGENE M. WESCOTT han dedicado mucho tiempo a la investigación de la actividad eléctrica en la alta atmósfera. Mende se doctoró en física por el Colegio Imperial de la Universidad de Londres en 1965. Trabajó de 1967 a 1996 en el laboratorio de investigación de Lockheed, en Palo Alto; es en la actualidad numerario del laboratorio de ciencias del espacio de la Universidad de California en Berkeley. Sentman estudió física del espacio con James Van Allen en la Universidad de Iowa, donde se doctoró en 1976. Tras 14 años en la de California en Los Angeles, Sentman pasó al departamento de física de la Universidad de Alaska en Fairbanks, donde ahora enseña. Wescott se doctoró en geofísica por Fairbanks en 1964. Trabajó durante tres años en el centro Goddard de vuelos espaciales, en Maryland, antes de regresar a la Universidad de Alaska en Fairbanks; aquí enseña geofísica.



LOS SURTIDORES AZULES, limitados a la región atmosférica situada por debajo de los 40 kilómetros de altitud, no son fáciles de observar. Una imagen en color *(derecha)* muestra que estos surtidores emiten luz de color azul oscuro, luz que no penetra fácilmente en la atmósfera, al contrario que los tonos rojizos predominantes en espectros y elfos. Así pues, para su observación es obligado elevarse por encima de la densa atmósfera inferior. Sentman y Wescott registraron estos misteriosos conos azulados cuando volaban sobre una fuerte tempestad en Arkansas, en 1994. Esta secuencia de imágenes de vídeo tomadas con una cámara monocromática *(a-d)* revela el surtidor formado por estas luces hacia las alturas, desde la cima de los cúmulonimbos, a velocidades de unos 120 kilómetros por segundo. La ciencia se esfuerza por reconciliar las diversas teorías y explicar exactamente cómo se producen los chorros azules.





LOS SUCESOS de rayos gamma y rayos X que acontecen por encima de las tormentas eléctricas son los más desconcertantes de todos los fenómenos eléctricos de gran altura. Su existencia fue descubierta hace sólo muy poco por uno de los instrumentos instalados a bordo del satélite Observatorio Compton de Rayos Gamma *(izquierda)*, que demostró la emanación de rayos gamma provenientes de la Tierra. Los rayos gamma son tenidos por signatura de fuentes nucleares o cósmicas a gran altura. No se esperaba que pudieran producirse en el seno de la atmósfera terrestre. En los espectros, por ejemplo, los electrones rara vez superan la energía de 20 electronvolts (la energía que adquiriría un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 20 volts), mientras que la generación de rayos gamma exige alrededor de un millón de electronvolts. Tal discrepancia equivale a la diferencia entre la energía de un explosivo químico y la de una bomba atómica. Como en el caso de los surtidores azules, los sucesos de rayos gamma están comenzando ahora a ceder ante el escrutinio científico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DISCOVERY OF INTENSE GAMMA-RAY FLASHES OF ATMOSPHERIC ORIGIN. G. J. Fishman, P. N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C. A. Meegan, R. B. Wilson, W. S. Paciesas, S. J. Goodman y H. J. Christian, en *Science*, vol. 264, páginas 1313 -1316; 27 de mayo de 1994.

PRELIMINARY RESULTS FROM THE SPRITES94 AIRCRAFT CAMPAIGN, 1: RED SPRITES. D. D. Sentman, E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton y M. J. Heavner en *Geophysical Research Letters*, vol. 22, n.º 10, páginas 1205-1208; 15 de mayo de 1995.

PRELIMINARY RESULTS FROM THE SPRITES94 AIRCRAFT CAMPAIGN, 2: BLUE JETS. E. M. Wescott, D. Sentman, D. Osborne, D. Hampton y M. Heavner en *Geophysical Research Letters*, volumen 22, n.º 10, págs. 1209-1212; 15 de mayo de 1995.

ELVES: LIGHTNING INDUCED TRANSIENT LUMINOUS EVENTS IN THE LOWER IONOSPHERE. H. Fukunishi, Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan y W. A. Lyons en *Geophysical Research Letters*, vol. 23, n.º 16, páginas 2157-2160; 1 de agosto de 1996.

PERFILES

Alina Quevedo

FRANCISCO SÁNCHEZ: Gestor estelar

"Me sorprendes en mal momento", advierte Francisco Sánchez, director y fundador del Instituto Astrofísico de Canarias (IAC), cuando comprueba que después de diez horas de actividad aún le espera una importuna visita en la que clava una mirada inquisitiva, cargada de humor e ironía. "Ven, ven, voy a hablar contigo", dice conciliador. A sus 60 años irradia energía, y la expresión de profunda fatiga se esfuma cuando sonríe como si lucubrara una travesura. Francisco Sánchez, si quiere, ejerce eso que llaman carisma. Pone tal concentrada atención en su interlocutor, que uno puede creer que es lo más importante que existe para él. Pero no es así. A Francisco Sánchez, un optimista patológico, lo que le fascina es resolver problemas estelares. Y, a la vista de su obra, no es una metáfora.

Desde el Observatorio del Teide, que junto al de Roque de los Muchachos en La Palma, forma parte de las instalaciones del IAC, participan con los españoles en la "explotación del cielo de Canarias" investigadores de toda Europa. El Reino Unido, Holanda e Irlanda utilizan los telescopios William Herschel de 4,2 m, Isaac Newton de 2,5 m y Jacobus Kapteyn de 1 m; Italia, el Telescopio Galileo de 3,5 m; Noruega, Suecia, Finlandia y Dinamarca el NOT de 2,5 m; Suecia, también, la Torre Solar. Hay en el Observatorio Roque de los Muchachos un telescopio meridiano danés y un complejo de detectores de rayos cósmicos en el que participan muchos países europeos. En el Observatorio del Teide, Francia e Italia utilizan el telescopio solar Themis. Bélgica tiene un reflector de 50 cm. Y Alemania ha elevado la torre de vacío VTT y dispone del telescopio solar Newton. Uno de los equipos más veteranos, el telescopio de 155 cm "Carlos Sánchez", es como un miembro de la familia estelar española. Con él se han formado muchos de los 84 doctores del IAC, desde los días en que la investigación infrarroja en España dependía exclusivamente del empeño de Carlos Sánchez discípulo y gran amigo de Francisco Sánchez, fallecido prematuramente en 1985.

"Los astrofísicos tenemos una visión de la realidad desde fuera. Muy mal nos iría si nos mirásemos sólo desde la estrecha perspectiva terrestre. Al observar al universo el hombre comprueba que es un bichito fatuo, pese a ser apenas un recién llegado", afirma el director del IAC cuya andadura investigadora comenzó a finales de los cincuenta en el Instituto de Optica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. En octubre de 1960, a raíz de recibir varias ofertas para encaminar su carrera, tomó una decisión que cambió su vida.

Le invitaron a participar en una investigación aplicada que tenía que ver con el ámbito militar. Otra propuesta dentro de la industria prometía cuadruplicar sus exiguos ingresos. Una tercera opción, proveniente de una universidad periférica, significaba un sueldo modesto y el uso de una vivienda destartalada en el monte, a 2400 metros de altitud. A cambio debía investigar las condiciones del cielo de Canarias, y reunir datos para fundamentar el establecimiento de un observatorio astronómico.

Sánchez descartó a los militares y dejó pasar la oportunidad de convertirse en un plácido burócrata. Le tentó la pesquisa ofrecida por la Universidad de La Laguna en Tenerife, donde en ese momento no existía facultad de física. El asunto era más que incierto, y los antecedentes históricos poco alentadores.

De esta etapa de su carrera Francisco Sánchez guarda un recuerdo que pone mirada soñadora a un hombre recio y contenido, un comunicador nato para la galería, que preserva un territorio personal exclusivo, inaccesible hasta para los que han compartido con él muchos años de trabajo. "Tuve que determinar qué había que medir y de paso diseñar algunos instrumentos. Se sabía poco entonces de prospección astronómica. Tenía que observar de día y de noche. Y como allí no siempre había quien echara una mano, también me tocaba sacar agua del pozo, cavar zanjas, levantar muros. Era como una película de pioneros. La verdad es que fue muy duro."

Llegó a la astrofísica cuando una ayuda de la Unión Astronómica Internacional le descubrió que, más allá de la observación astronómica de planetas y otros objetos celestes, según la mecánica clásica, estaba el estudio del universo, su origen, composición química y cambios. "Quedé deslumbrado al entender que somos polvo de estrellas. Decidí aprender astrofísica para penetrar en el conocimiento del universo."

"En astrofísica hemos pasado de estar por debajo de cero a ocupar una posición respetable", asegura. Su estrategia para conseguirlo no iba a ser convencional. Pasaba por utilizar el cielo de las Islas como valor de cambio para atraer científicos, experiencia y técnica. "En definitiva cultura, porque en España muchos presumen de cultos cuando son analfabetos funcionales en ciencias, en una época en que tanto el pensamiento filosófico como la vida cotidiana necesitan las respuestas que van dando la física y la astrofísica."

En los sesenta, cada vez que Francisco Sánchez intentaba argumentar las bondades del firmamento canario los entendidos arrojaban polvo a su proyecto. "En realidad hablaban de oídas. No se habían molestado en hacer estadísticas fiables referidas a años completos", aclara. Su poder de persuasión, o tal vez de seducción, daría resultados. Francisco Sánchez animó al investigador del Observatorio de la Universidad de Burdeos René Dumont a acercarse a las Islas en unas vacaciones. Casualmente el astrofísico francés estaba terminando de construir un pequeño telescopio muy especial.

Sánchez, que en ese momento se apañaba con uno comprado a un aficionado catalán, y los equipos que había armado él mismo, propuso a Dumont que instalara su telescopio en Izaña, en lo que imaginaba como el

Observatorio del Teide. Dumont aceptó. Una foto de esos días los muestra ufanos junto a un objeto desangelado, el telescopio de la Universidad de Burdeos.

Dumont sonríe tímidamente. El científico español que lo acompaña es un toledano nacido en 1936, hijo de militar, que había estudiado física en Madrid. Desde 1961 residía en Tenerife con su familia. Entonces pocos supieron de esa minúscula gran victoria de la astrofísica en España. El telescopio aportado por Dumont, "primero decente que llegaba a Izaña", era un instrumento fotopolarimétrico concebido para investigar la luz del cielo nocturno. Con el telescopio de Burdeos, desde el Observatorio del Teide en Tenerife, Francisco Sánchez y René Dumont analizarían la luz zodiacal.



Francisco Sánchez, fundador y actual director del Instituto de Astrofísica de Canarias

"Está constituida por luces de distinto origen causadas por fenómenos terrestres: auroras, luminiscencia del aire y luz esparcida en la atmósfera. La luminiscencia atmosférica resulta importante para la geofísica, mientras que la luz zodiacal es de gran interés astronómico. Atañe a la naturaleza del medio interplanetario constituido por plasma, viento solar, y polvo o micrometeroides. Los micrometeroides, polvo cósmico, son los responsables de la luz zodiacal. La presencia de materia polvorienta por todas partes lleva a preguntarse si se trata simplemente del residuo final de evoluciones catastróficas del universo conocido o si, por el contrario, es el embrión de un universo siempre en formación. De una u otra forma, la presencia de partículas sólidas en el espacio interplanetario ocupa un lugar importante en la historia de nuestro sistema solar", va desgranando.

El primer resultado se obtuvo en 1964. "Consistió en probar la validez del método de alturas múltiples que permite separar en la luz del cielo nocturno la componente extraterrestre del continuo de la luminiscencia atmosférica". Más de una década trabajaron en este campo juntos Dumont y Sánchez, con notable éxito. Confirmaron la extensión de la luz zodiacal a toda la esfera celeste, "un hecho hasta entonces bastante controvertido". Sus observaciones les permitirían elaborar un modelo empírico del medio interplanetario a partir de determinaciones de luminancias, medida del brillo y grado de polarización de la luz zodiacal sobre todo el cielo que aún está vigente y es ampliamente citado. "La constancia global observada en la luz zodiacal no significa que la nube micrometeroidea sea inmóvil y permanente. En la cercanía del sol los granos resultan volatilizados. La constancia registrada debe entenderse como el resultado de un equilibrio dinámico en la densidad espacial del polvo interplanetario".

En 1966, *Annales D'Astrophysique* publicó su aportación al conocimiento de la luz zodiacal, con el primer mapa de valores promedios del brillo de la luz zodiacal y del grado de polarización sobre el cielo. Con esos mimbres tejió su tesis doctoral, "Contribución al conocimiento del medio interplanetario por fotometría y polarimetría de la luz zodiacal", primera en astrofísica presentada en España en 1969.

La Universidad de La Laguna le nombró en 1973 director del incipiente Instituto Universitario de Astrofísica, cuyo desarrollo, "plagado de peripecias y no pocos tropiezos", condujo a un acuerdo entre la propia Universidad tinerfeña, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Mancomunidad Interinsular de Cabildos de la Provincia de Santa Cruz de Tenerife, para crear el Instituto de Astrofísica de Canarias, dotado de entidad jurídica como consorcio público en 1982.

Quienes han chocado con Francisco Sánchez en una mesa de negociación describen un contrincante muy fuerte. En contraste, también afirman que sabe ser flexible y dialogante. El reconoce que siempre escucha a los demás porque," hasta tu peor enemigo puede tener razón". Lo cierto es que, capeando temporales, Sánchez consigue su objetivo aun en las circunstancias aparentemente menos favorables. "Suele ser más respetado que querido", señala un astrofísico alemán al que una manifiesta antipatía por el español no impide elogiar su labor al frente del IAC.

Su trayectoria parecería marcada sólo por el éxito, pero Francisco Sánchez, que no encuentra lugar para quejas y reproches, ha sufrido, y en ocasiones arriesgado mucho. Tal vez lo peor fue que se vio forzado a renunciar a dedicar más tiempo a su verdadera vocación. "Por desgracia no puedo hacer ciencia. Pero los que me siguieron son mejores que yo." ¿Qué cómo se ha librado del efecto corrosivo de la envidia? Después de pensarlo un poco responde. —No lo sé bien. Tal vez con fe y aguante. Sí, eso es. Creyendo en lo que hago. ¿No se dice eso de 'ladran, luego cabalgamos, Sancho'? Pues así".

CIENCIA Y SOCIEDAD

Alimentación humana

Helechos, leche y cáncer

La leche es uno de los mejores alimentos que existen para el infante. Contiene proteínas digeribles abundantes, grasas, azúcares, vitaminas, minerales y hormonas. Pero también tiene otros componentes menos atractivos, como colesterol, lactosa poco tolerada por mucha gente y algunas proteínas que causan reacciones alérgicas. Hay todavía otros bastante más nocivos: aflatoxinas M1 y M2, triazinas, malation y otros plaguicidas, que la vaca incorpora a través de pastos tratados con agroquímicos y complementos concentrados e indebidamente procesados.

A esta negra lista viene a sumarse ahora otro compuesto, el ptaquilósido. Se convierte en potente carcinógeno y mutágeno al penetrar en la célula y enlazarse con la adenina del ADN durante el proceso de replicación, causando aberración cromosómica y degradación de algunos genes. Alcanza esta hábil penetración celular mediante una combinación molecular de un azúcar —glucosa— que le da solubilidad en agua, más un fragmento sesquiterpénico que, al desprenderse de la glucosa, se transforma en un vigoroso agente alquilante que se une irreversiblemente a las bases nucleosídicas de los ácidos nucleicos.

Según Uvidelio Castillo y el autor, investigadores de la Universidad de Los Andes en Venezuela, junto con Barry Smith y Denis Lauren, del Centro Ruakura de Investigación en Hamilton, Nueva Zelanda, codescubridores de este compuesto en la leche, la fuente de ptaquilósido en lácteos vacunos es completamente natural. Se encuentra en el helecho macho *Pteridium aquilinum*, que las vacas devoran en épocas de sequía cuando los pastos frescos son escasos y este pteridófito permanece verde y atractivo. Al comérselo, los animales ingieren una cantidad sustancial de ptaquilósido, 10 gramos por día y más, que excretan en parte —hasta cerca del 10 %— por la leche en los siguientes días. Por ejemplo, si una vaca consume unos pocos kilos de helecho por cada uno de cinco días consecutivos, comenzará a excretar ptaquilósido desde el segundo día en adelante en cantidad creciente. Al suspender la ingestión de helecho, continuará expulsando este compuesto en su leche por tres días más. Del mismo modo, si un animal devora helecho por varios días, suspende temporalmente su dieta de *Pteridium* para comerlo nuevamente en forma irregular, generará pulsos de ptaquilósido en su leche que ampliarán considerablemente el riesgo de que este carcinógeno sea ingerido por alguna persona.



Pteridium aquilinum, *helecho macho que contiene ptaquilósido, un potente carcinógeno*

Por consiguiente, si alguien toma dos vasos de leche de una vaca que ha comido 6 o 7 kg de helecho que contenga aproximadamente 5 g de ptaquilósido, y que produce unos 20 L/día de leche, esa persona estará ingiriendo alrededor de 10 mg de carcinógeno tan potente.

Es siempre difícil establecer relaciones de causa a efecto entre determinado compuesto y tumoraciones, ya que el cáncer es un proceso lento. Pero la asociación entre *Pteridium* y cáncer en animales ha venido estudiándose desde hace muchos años. Se sabe que esta planta es causante de numerosas enfermedades en el ganado caballar, caprino y bovino; por citar algunas: parálisis, avitaminosis B1, degeneración retinal y de órganos internos —hígado, riñón—, todavía mal definidas, y notoriamente adenocarcinomas del esófago, estómago, intestino y vejiga urinaria. Esta última se conoce en el vacuno como hematuria enzoótica bovina (HEB). La incidencia de HEB en el ganado puede ser muy elevada, alcanzando hasta 18 % de los bóvidos en zonas en que *Pteridium* es abundante. Peor aún es la velocidad de avance de la HEB. Se ha visto que animales expuestos por primera vez a este helecho desarrollan hematuria en tan sólo seis meses, muriendo de sus consecuencias antes de los dos años.

El cuadro humano también tiene visos trágicos. En Costa Rica, Jorge Villalobos ha conducido extensos estudios toxicológicos buscando agentes causales de cáncer gástrico entre los pobladores de zonas lecheras en que *Pteridium* es una maleza. Al examinar las áreas geográficas ocupadas por helecho macho y las zonas en que el cáncer gástrico es el de mayor incidencia en la población humana, ha encontrado una dramática

superposición en sus mapas. En el estado de Mérida, que es el tercer productor lácteo de Venezuela, y en donde el 40 por ciento del ganado lechero se cría en zonas frías propensas al crecimiento de *Pteridium*, la proporción de decesos por cáncer gástrico frente a todos los otros tipos de cáncer en la población rural masculina mayor de 50 años es de un alarmante 64 %. El hallazgo de ptaquilósido en la leche de vacas que consumen este helecho bien puede ser el eslabón que une estos elementos en un solo cuadro helecho-vaca-leche-cáncer gástrico.

El *Pteridium* no es una planta exótica o rara. Por el contrario, crece en todos los continentes, forma densas masas que excluyen otra vegetación y compite favorablemente contra muchos pastos, erigiéndose en una de las cinco malezas predominantes del planeta. Además, es difícil de controlar con herbicidas, mientras que el fuego estimula explosivamente su crecimiento desde rizomas subterráneos. Constituye, pues, una seria amenaza para nuestra salud corporal y económica, a tomar muy en cuenta en lo sucesivo.

MIGUEL ALONSO-AMELOT
Universidad de los Andes,
Mérida (Venezuela)

Meandros

Viveros de biodiversidad

Los meandros de los ríos no son caprichos de la naturaleza, sino resultado inevitable del trabajo realizado por el agua en su tenaz erosión del sustrato sólido por donde avanza. Algunos modelos matemáticos asimilan los meandros a un estado estacionario entre las ondulaciones que efectúa el río al atravesar la llanura aluvial y los cortes que puede producir en tales ondulaciones. Cortes, meandros abandonados y lagunas se forman a un ritmo lento, en un intervalo temporal que abarca de 20 o 30 años hasta siglos; el lapso dependerá de la energía que posea el río.

Según la acción ejercida por el curso fluvial, aparecerán ambientes acuáticos de amplio espectro; sobre todo, en las zonas medias del curso. Observaremos canales secundarios, "deltas internos", bosques de ribera, lagunas y marjales, entre otros; difieren en su grado de sedimentación y de conectividad con el canal principal y alcanzan su máxima complejidad en sistemas de grandes dimensiones.

Si atendemos a la hidrología del lugar, observaremos que las zonas húmedas asociadas al río sustraen caudal, volumen que retienen para liberarlo más tarde. Con ello demoran los picos de avenida y, cuando confluyen varios canales secundarios, su desincronización provoca que las aguas de avenida no lleguen al mismo tiempo al río.

La conexión hidrológica entre el cauce principal y sus sistemas húmedos asociados puede llevarse a cabo a través de la capa freática, subterránea. Pero son las avenidas lo que confiere a estos sistemas gran parte de su complejidad y características distintivas. Las avenidas extienden el río hacia las llanuras inundables, sistema de elevada productividad y dotado por lo común de una vegetación de ribera muy desarrollada.

Durante la avenida, los organismos acuáticos emigran del canal principal a la llanura inundable. Ocupan entonces los hábitats y aprovechan los recursos allí disponibles. Cuando las aguas de avenida se retiran, los nutrientes y la materia orgánica de la llanura de inundación siguen hacia el curso principal, brazos laterales y masas de agua aisladas, acarreando biomasa nueva en forma de fases juveniles de peces, invertebrados y aves acuáticas. A cambio, un nuevo aporte de sedimentos queda sobre la llanura.

Esa mutua influencia se perpetúa cuando los episodios de avenida



Meandro y sistemas derivados en una sección del rio Ródano

ocurren con periodicidad regular. El momento preciso de reproducción de muchas especies piscícolas queda así acoplado a la estación de aguas altas, lo que les permite penetrar en los anexos, donde acontece la puesta y el crecimiento de los jóvenes. En el Gran Pantanal del río Paraná, por citar un ejemplo, las migraciones pueden alcanzar 500 km río arriba, hasta encontrar un lugar adecuado para la puesta; las avenidas se corresponden allí con la puesta. Huevos, alevines y juveniles derivan río abajo y penetran en los distintos sistemas asociados. Cuando las avenidas adquieren una frecuencia regular, se maximiza la producción del sistema, mucho mayor aún a la alcanzada en el canal principal.

El flujo de agua varía a lo largo y ancho del meandro. La granulometría de los sedimentos, su porosidad y densidad divergen según la zona considerada. Las perturbaciones periódicas inician procesos sucesionales y estimulan la diversidad biológica al ofrecer posibilidades a los competidores para coexistir. Si nos fijamos en el canal principal y sus sistemas asociados, veremos que constituyen uno de los ecosistemas acuáticos de mayor biodiversidad, no sólo por lo que concierne a las especies de peces, sino también de otros grupos faunísticos y vegetales. En las grandes llanuras de inundación menudean peces distintos, distribuidos en uno u otro ambiente ligado al cauce fluvial en razón de sus preferencias dietéticas y hábitos reproductores. La diversidad se refleja también a pequeña escala: la microfauna que ocupa el lecho del río difiere entre las orillas opuestas de un mismo meandro.

La interacción entre el bosque y el río conduce a situaciones de coevolución. Se conocen sobre todo las que se dan en sistemas tropicales. La acción erosiva del río en su avance por la llanura renueva el bosque y abre sin cesar nuevos espacios que colonizarán las plantas pioneras. Esta nueva situación se superpone a las causadas por el río anteriormente, lo que explica la secuencia de distintos matices de verde, cada uno de ellos representativo de una vegetación propia de la secuencia sucesional.

A propósito de las aves que habitan en esos bosques sucesionales se han descrito casos de territorialidad: las especies más despóticas o agresivas ocupaban las partes más productivas del gradiente de vegetación, mientras que las más dóciles quedaban relegadas a los espacios menos productivos. Tales situaciones conducen a un gran número de especies que coexisten en un espacio único.

No es fácil determinar si los sistemas fluviales de zonas templadas remedan los elevados niveles de heterogeneidad del hábitat y de biodiversidad de los sistemas tropicales. Por una razón poderosa: han sufrido profundas alteraciones. Las modificaciones de estos sistemas de tan compleja hidrología (simplificación de los meandros, remoción de obstáculos, drenaje o rellenamiento de meandros abandonados) ha sido y es práctica habitual en nuestro entorno inmediato. Todas estas acciones contribuyen al empobrecimiento del sistema y afectan su funcionamiento de freno para las avenidas, conducen a la disminución de refugios para los organismos y disminuyen su diversidad.

En los sistemas mediterráneos, a la acción humana cabe añadir la poca regularidad y la acusada intensidad de las avenidas, que dificultan la sincronización de los organismos con el medio físico y truncan los procesos sucesionales en sus etapas iniciales. A pesar de estas limitaciones, los anexos pueden proveer refugios para los organismos que son cruciales en episodios catastróficos, y desde los que es posible recolonizar el canal fluvial más tarde. La capacidad de los meandros y sus áreas asociadas para convertirse en vivero de biodiversidad es evidente, si consideramos que se trata de corredores naturales por donde trasiegan las especies.

SERGI SABATER
Departamento de ecología
Universidad de Barcelona

Silenciamiento telomérico

En la levadura

Eucariotas son los organismos cuyas células poseen un núcleo separado del citoplasma por una membrana. Así ocurre en las levaduras. En los eucariotas, el ADN se encuentra empaquetado en el interior del núcleo celular formando parte de una estructura compleja, la cromatina. La unidad básica de organización cromatínica es el nucleosoma. Consta éste de 146 pares de bases de ADN y de una serie de proteínas denominadas histonas (H2A, H2B, H3 y H4).

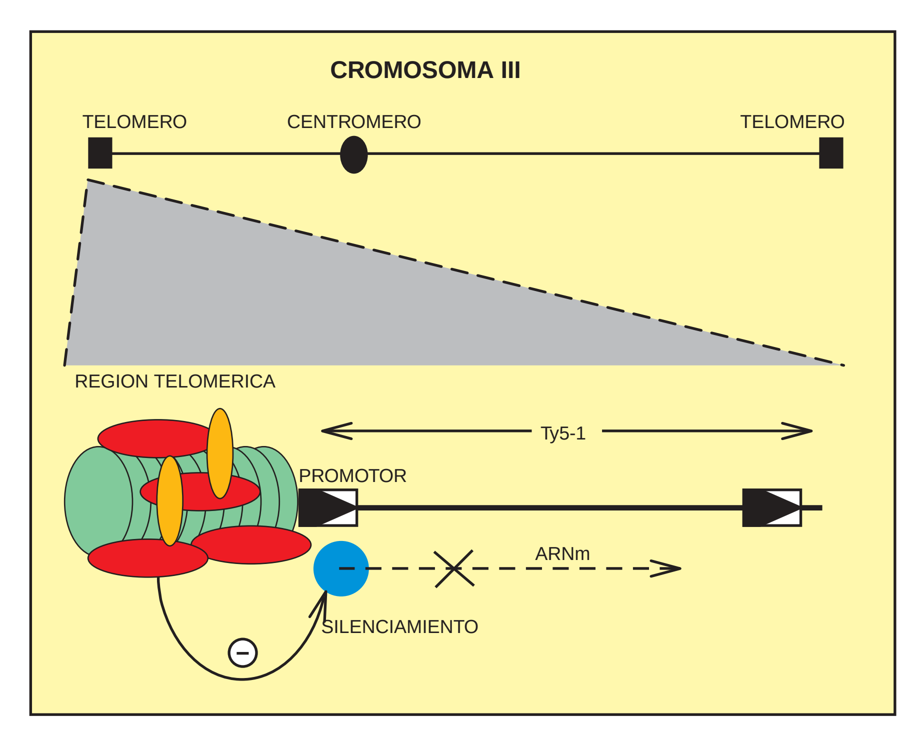
A su vez, los nucleosomas se condensan y dan lugar a niveles de organización superiores hasta constituir los cromosomas. Un tipo especial de cromatina es la heterocromatina: fracción del genoma eucariota que permanece condensada a lo largo del ciclo celular. La heterocromatina se encuentra asociada con proteínas especiales, además de las histonas, e impide, reprime, la expresión de los genes vecinos.

El genoma eucariota contiene elementos móviles muy dispares —transposones— que pueden saltar de un lugar a otro dentro de la secuencia génica. Entre estos elementos se encuentran los retrotransposones que, lo mismo que los retrovirus, utilizan la enzima retrotranscriptasa para su replicación. Ciertas familias de retrotransposones no se ubican aleatoriamente en el genoma, sino que saltan a sitios específicos que presentan una estructura cromatínica peculiar. Fenómeno que no debe sorprendernos, si consideramos que los procesos metabólicos que guardan relación con la molécula de ADN implican interacciones con la cromatina, además de relacionarse con la molécula de ADN exenta de proteínas.

Entre las familias de retrotransposones que reconocen estructuras cromatínicas específicas merece destacarse la familia Ty5 de la levadura. Los retrotransposones del tipo Ty5 se integran preferentemente en regiones heterocromatínicas, que abarcan regiones teloméricas.

En los telómeros de la levadura distinguimos varias proteínas características. Recordaremos la Rap1, la Sir3 y la Sir4. La proteína Rap1 interacciona con la secuencia de ADN telomérica. Las proteínas Sir3 y Sir4 interaccionan entre sí, con Rap1 y con las histonas H3 y H4, contribuyendo a crear una estructura heterocromatínica típica. Dicha estructura reprime la expresión de genes no teloméricos cuando se sitúan de modo artificial en las inmediaciones de los telómeros. A esta represión transcripcional se le ha denominado efecto de posición telomérica (TPE).

Aunque se ha estudiado con bastante profundidad el TPE en la levadura mediante sistemas artificiales, sabemos muy poco de su significado biológico. Para avanzar en este terreno habría que encontrar sistemas biológicos que estén



El telómero izquierdo del cromosoma III de la levadura silencia al retrotransposón Ty5-1

sometidos a TPE en su localización cromosómica habitual. Una investigación reciente acometida por los autores de este artículo ha mostrado que un retrotransposón de la familia Ty5 está sometido a TPE en su entorno natural. Se trata del elemento Ty5-1, retrotransposón que se aloja en la región telomérica izquierda del cromosoma III de la levadura. Cuando se altera la estructura heterocromatínica del telómero mutando la proteína Sir3 o la histona H4, se levanta la represión que existía contra la expresión del elemento Ty5-1. Por tanto, la heterocromatina telomérica silencia al retrotransposón Ty5-1 en su entorno natural.

Puesto que el ciclo biológico de los retrotransposones comienza con la transcripción de la molécula de ADN en ARN, el silenciamiento de la transcripción de un retrotransposón equivale a inhibir su salto. El hecho de que los retrotransposones de la familia Ty5 no salten al azar, sino que salten a regiones heterocromatínicas silenciadas podría resultar beneficioso para la célula, por la sencilla razón de que el salto de los elementos móviles causa estrés mutagénico, capaz de obstaculizar la viabilidad celular.

Dos notas distintivas caracterizan al TPE: es variegado y semiestable; es decir, no se manifiesta en todas la células de una población, ni lo heredan necesariamente las células hijas. Con estas propiedades, el TPE es un mal candidato para regular la expresión de los genes esenciales para la levadura, que se estiman en un 15 %. Sin embargo, el TPE podría regular eficientemente la transcripción y, por tanto, la transposición de ciertos retrotransposones.

En una población celular en la que la expresión de un retrotransposón telomérico sea variegada y semiestable, el daño mutagénico causado por la transposición se restringiría a una fracción de la población. En este contexto, el silenciamiento telomérico podría funcionar como una óptima puerta de entrada para el elemento móvil, que podría evolucionar para saltar a lugares poco críticos del genoma, e incluso beneficiar a la célula. Resulta interesante resaltar que algunas repeticiones teloméricas de levaduras se asemejan a elementos móviles y que en *Drosophila* los telómeros están formados por retrotransposones.

MIGUEL A. VEGA-PALAS
Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis,
Universidad de Sevilla – CSIC

SABRINA VENDITTI
Y ERNESTO DI MAURO
Depto. de genética y biología molecular,
Universidad de Roma "La Sapienza"

Presión arterial

Regulación

La presión que alcanza la sangre en nuestras arterias viene determinada por la actividad del sistema de bombeo (el corazón), el volumen de sangre circulante y la resistencia que opone al paso de la sangre el sistema circulatorio periférico. El mantenimiento de la presión del sistema depende no sólo del tono vascular, sino también de la función coordinada de los riñones, el sistema circulatorio y los mediadores vasoactivos.

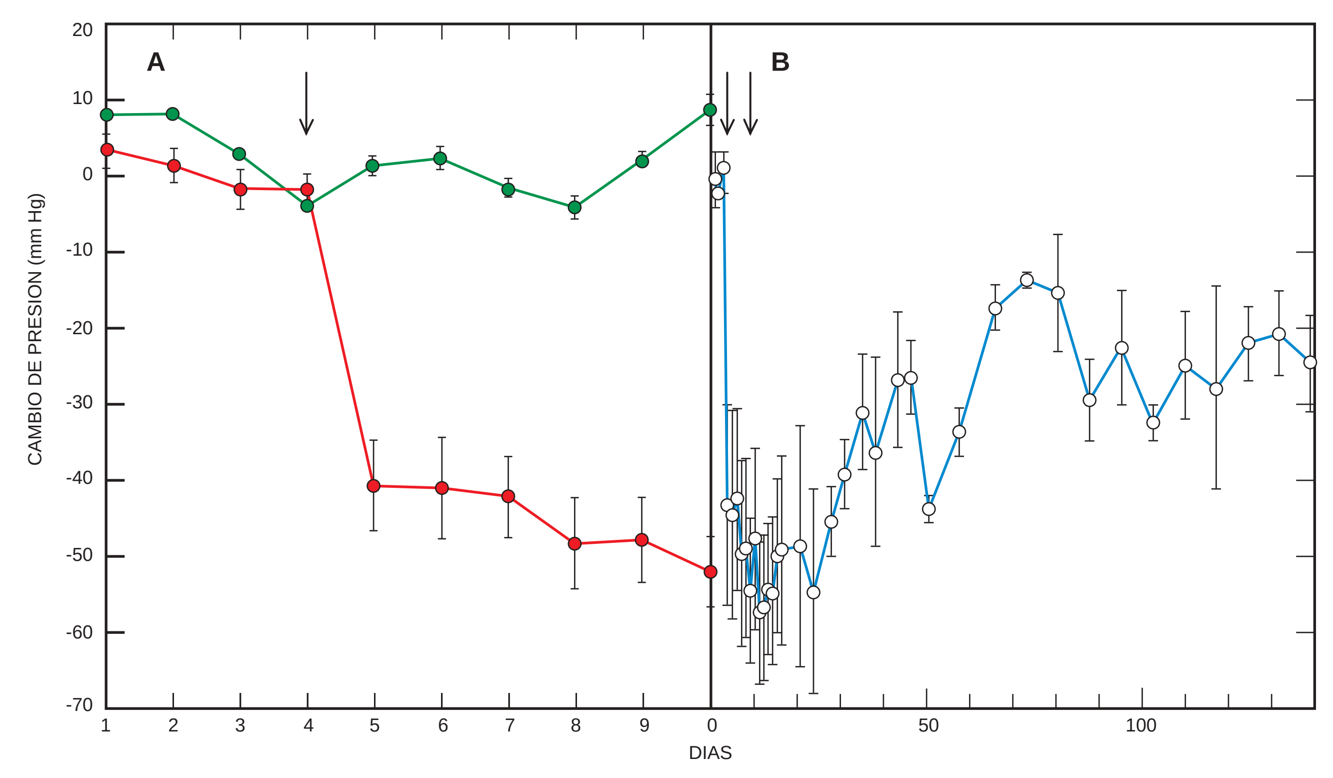
El sistema circulatorio en su conjunto es capaz de adaptaciones a corto y largo plazo, tales como las que se generan con cambios de clima o las que dependen de la edad, respectivamente. En condiciones estables, el sistema vascular contiene un volumen fijo, lo que permite que la función transportadora de la sangre se lleve a cabo de forma regular. Una señal de vaciamiento dispara los mecanismos que activan el llenado; una señal de sobrellenado activa el vaciamiento.

Las resistencias periféricas, una función del tono vascular, dependen de las características viscoelásticas del sistema y del estado de apertura o cierre de los esfínteres precapilares. El tono vascular basal, que es vectorialmente opuesto a la fuerza de la presión arterial, se debe a la actividad intrínseca de las células del músculo liso vascular, independientemente de la inervación y de mediadores circulantes. Este tono intrínseco representa sólo una parte de la regulación del tono en el animal entero, pues a él se superpone la acción permanente de factores auto, para y endocrinos y del sistema nervioso autónomo.

La regulación del tono vascular y la del flujo sanguíneo local están íntimamente imbricadas, de modo que una perturbación de una influye directamente en la otra. El flujo sanguíneo local es capaz de regularse en función de la actividad metabólica tisular en un momento dado, así como por un mayor o menor aporte de oxígeno y otros nutrientes.

En respuesta a la concentración de oxígeno, se produce un ajuste relativamente rápido en que intervienen factores vasodilatadores del tipo de la adenosina, y la apertura o cierre de los esfínteres precapilares y de las metaarteriolas.

Asimismo, un aumento rápido de la presión arterial en territo-



Efecto de la transferencia genética del factor de crecimiento para fibroblastos (FGF) sobre la presión arterial de ratas espontáneamente hipertensas. A: Cambios en presión arterial en ratas SHR de 18 meses tras la transfección sistémica del gen de FGF (círculos rojos) *o del plásmido control* (círculos verdes)*. B: Evolución de la presión arterial en cuatro ratas transfectadas con el gen del FGF. La presión arterial media antes del tratamiento era de 233 mm Hg. Los cambios están expresados respecto a los valores de presión arterial antes de recibir el tratamiento con FGF. Las flechas representan el momento de administración del FGF.*

rios microvasculares determina un aumento del flujo sanguíneo que retorna rápidamente a niveles normales. Esta autorregulación ocurre bien por mecanismos "metabólicos" (a mayor presión, mayor flujo, mayor aporte de nutrientes y consiguiente constricción arteriolar) o "miogénicos" (el estiramiento del músculo liso vascular provoca en el mismo una respuesta reguladora de contracción).

Entre los mediadores más eficaces del ajuste del tono vascular está el factor relajante derivado de endotelio, sustancia químicamente similar al monóxido de nitrógeno y más conocido como óxido nítrico (NO). Este factor gaseoso, de vida media muy corta, se libera en el endotelio de forma permanente a concentraciones bajas, si bien puede aumentar significativamente su síntesis en respuesta a varios mediadores y en particular a un aumento de las fuerzas de rozamiento vascular, situación que tiene lugar cuando hay un aumento brusco del flujo vascular. La síntesis de este mediador en arteriolas de tamaño medio produce un aumento del diámetro de los vasos de resistencia, permitiendo una disminución de las resistencias periféricas y una transmisión correcta de los cambios locales en el flujo vascular de la microcirculación.

La adaptabilidad del tono vascular se ejerce de forma aguda o crónica; ambas implican conexiones de alta complejidad. En particular, la respuesta aguda tiene como componente principal al sistema nervioso autónomo (simpático) y su estimulación provoca una constricción generalizada de la mayoría de las arteriolas del organismo, que ocurre en un tiempo inferior al minuto. Esta constricción se basa en la transmisión de señales intracelulares vehiculadas por fosfolipasa C a través de la unión del mediador simpático, la norepinefrina, a sus receptores específicos en las células del músculo liso vascular.

A más largo plazo la presión arterial está regulada por factores humorales y por la homeostasis hidrosalina controlada por el riñón. Entre los factores humorales, la mayoría de los cuales tienen una potente acción paracrina en la propia pared vascular, hay factores vasodilatadores (sistema de las cininas, serotonina, histamina y algunas prostaglandinas) y vasoconstrictores (sistema renina-angiotensina, vasopresina y endotelina).

Recientemente se ha puesto de manifiesto que el factor de crecimiento para fibroblastos (FGF) tiene un efecto vasodilatador agudo cuando se infunde a concentraciones nanomolares en el animal entero. Este efecto vasodilatador parece depender en parte de la síntesis de óxido nítrico y en parte de canales de K^+ sensibles a ATP. Este factor, trófico para muchos sistemas celulares incluido el endotelio vascular, podría asimismo intervenir en la regulación de la presión arterial a más largo plazo.

En ratas espontáneamente hipertensas (SHR) se ha observado que con la edad, a medida que desarrollan hipertensión, va desapareciendo el contenido endotelial de FGF, y que cuando se repleciona el endotelio con FGF por vía sistémica o mediante transferencia genética, se produce una normalización de los niveles de presión arterial. Esta repleción de FGF se asocia con una reaparición de la expresión endotelial de NO sintasa tipo-3, enzima que cataliza la síntesis de NO en el endotelio, cuyos niveles también disminuían progresivamente en las ratas SHR con

la edad, a medida que desarrollaban hipertensión. Es posible que el trofismo ejercido por el FGF sobre la célula endotelial facilite la expresión de genes críticos para su función, entre los que estaría el que codifica para la NO sintasa, explicando así el descenso de presión arterial.

Santiago Lamas
y Guillermo Giménez-Gallego
Centro de Investigaciones Biológicas (CSIC),
Madrid.

Aceite

Enranciamiento

¿Por qué se vuelve rancio el aceite? Para el químico, porque se han formado compuestos peroxídicos. Sometidos a estudio estos productos intermedios del enranciamiento, se han obtenido grandes avances. Gracias, sobre todo, al desarrollo de métodos analíticos, al aislamiento y caracterización de algunas enzimas lipogenosas, al descubrimiento de la actividad biológica asociada con los productos de autoxidación de los ácidos grasos insaturados y a la síntesis de compuestos precursores del enranciamiento de los aceites.

En el enranciamiento, los radicales peroxídicos formados durante el proceso oxidativo sustraen de modo selectivo el átomo de hidrógeno unido más débilmente en la molécula del ácido correspondiente.

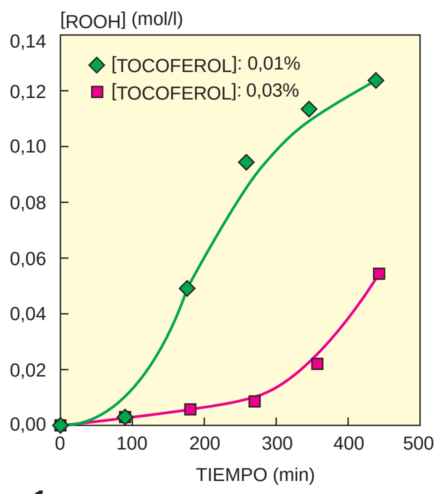
Los aceites vegetales comestibles al sufrir los procesos oxidativos se deterioran. A la merma consiguiente de valor nutritivo debe agregarse la aparición de compuestos volátiles que imparten olores y sabores desagradables muy perjudiciales para la comercialización de estas sustancias grasas. El problema de la oxidación de aceites compromete, pues, la calidad y vida útil de los mismos; puede incluso provocar la aparición de sustancias dañinas para la salud.

La autoxidación de los lípidos sólo puede evitarse por la exclusión total del oxígeno u otras sustancias oxidantes del sistema en el que se encuentran presentes. El empleo de inhibidores puede disminuir la velocidad de reacción o prolongar el período de inducción del proceso radicalario mediante el cual se produce el enranciamiento de aceites y grasas.

Se exige de los antioxidantes que sean eficaces a bajas concentraciones, inocuos, manejables y baratos. Se tiende a sustituir los antioxidantes artificiales, habituales, por otros naturales. Avalan esa medida no sólo razones ambientales, sino también su baja toxicidad. En España, el aceite de oliva no debe llevar ningún agente antioxidante como aditivo, pues contiene ciertas sustancias (vitamina E, polifenoles, etc.) que lo protegen suficientemente de los procesos oxidativos.

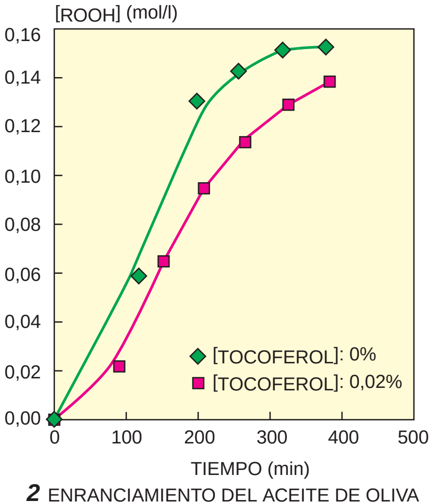
El aceite de oliva refinado y el aceite de orujo pueden llevar α-tocoferol (200 mg/kg) para compensar las pérdidas producidas durante la elaboración. Para aceites de semilla oleaginosas, como el girasol, la reglamentación permite añadir ciertos antioxidantes: tocoferoles de síntesis (α-tocoferol, γ-tocoferol y δ-tocoferol), galatos (de propilo, de octilo y de dodecilo) y fenólicos (butilhidroxianisol, butilhidroxitolueno y mezclas de galatos con uno u otro de estos fenólicos, o con los dos).

Los tocoferoles (vitamina E) son las sustancias naturales que acostumbran emplearse como agentes antioxidantes de las grasas y, en particular, de los aceites vegetales comestibles. Por su estructura química, los tocoferoles derivan de un núcleo bicíclico, el cromano, procedente de la condensación del benceno con el pirano. Este núcleo lleva además una cadena lateral de tipo isoprenoide con dieciséis átomos de carbono y totalmente saturados. Los tipos de tocoferoles existentes son siete, dotados de una estructura similar y diferenciándose en los tipos de radicales presentes en el núcleo bicíclico. Los tocoferoles dificultan, si no impiden, la peroxidación lipídica de las grasas y aceites.

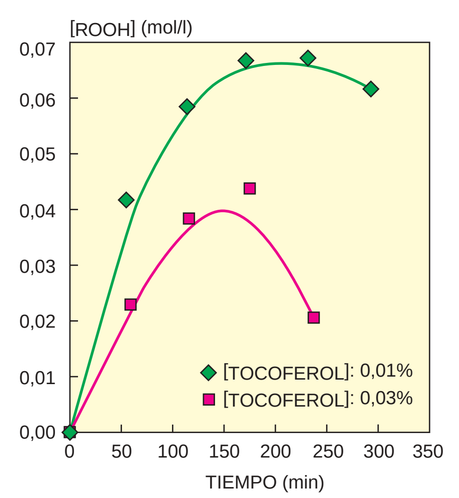




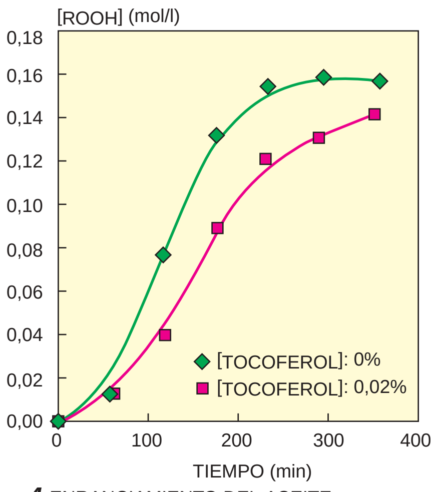
1 ENRANCIAMIENTO DEL ACEITE DE OLIVA
T: 120ºC
ANTIOXIDANTE: δ-TOCOFEROL



2 ENRANCIAMIENTO DEL ACEITE DE OLIVA
T: 130ºC
ANTIOXIDANTE: α-TOCOFEROL



3 ENRANCIAMIENTO DEL ACEITE DE GIRASOL
T: 140ºC
ANTIOXIDANTE: δ-TOCOFEROL



4 ENRANCIAMIENTO DEL ACEITE DE GIRASOL RICO EN OLEICO
T: 130ºC
ANTIOXIDANTE: α-TOCOFEROL

Nuestro equipo de la Universidad de Málaga ha investigado el comportamiento del aceite de oliva refinado, girasol refinado y girasol rico en oleico a distintas temperaturas y concentraciones de α-, y δ-tocoferol, respectivamente. Y llegamos a las siguientes conclusiones:

—En los tres aceites estudiados, el período de inducción es mayor y el contenido global de hidroperóxidos menor al utilizar como antioxidante el δ-tocoferol en vez del α-tocoferol. De donde se infiere el mayor poder antioxidante del δ-tocoferol frente al α-tocoferol en contraposición con las respectivas actividades biológicas.

—El factor de protección para los tres aceites en el proceso de enranciamiento oxidativo en presencia de α-tocoferol a 130 ºC corresponde a una concentración crítica del antioxidante del 0,025 %.

Se comprobó, asimismo, que la temperatura es un factor mucho más importante que el nivel de concentración de tocoferol en la desaparición de los ácidos oleico y linoleico, componentes básicos de los tres aceites estudiados.

PEDRO J. MARTÍNEZ DE LA CUESTA,
E. RUS MARTÍNEZ
Y M. GALDEANO CHAPARRO
UNIVERSIDAD DE MALAGA

Microorganismos litobiónticos

Técnicas de observación

Todos hemos visto rocas cubiertas de líquenes, es decir, de asociaciones simbióticas entre un hongo y un alga o una cianobacteria. La verdad es que los talos liquénicos cubren el 8 % de la superficie terrestre. Lo que mucha gente ignora es que en el interior de las rocas existen microorganismos.

Para conocer la relación entre talos liquénicos saxícolas, microorganismos litobiónticos y sustrato rocoso, hemos de recurrir a un método de larga tradición en medicina. Esta, para llegar a diagnósticos más precisos se vale de radiografías, ecografías, tomografías axiales computerizadas y otros métodos de formación de imágenes.

No parece adecuado extraer los microorganismos de las fisuras y cavidades de la roca donde se encuentran para su procesamiento y preparación ulteriores. O lo que es lo mismo, la observación de talos y microorganismos debe hacerse *in situ*. Se trata, por lo demás, de una vieja norma de ecología microbiana según la cual los organismos deben observarse en su medio natural. Una norma que no siempre se ha cumplido. Por ejemplo, en los estudios de biodeterioro de monumentos se ha puesto énfasis en los cultivos *in vitro* de los microorganismos existentes en el interior del material pétreo, al objeto de poderlos identificar tras su crecimiento. Pero tales técnicas deben aplicarse con precaución; muchos microorganismos se resisten a los cultivos.



1. Sobre los granitos de la Sierra de Guadarrama aparecen líquenes crustáceos; abunda el de color gris perteneciente al género Aspicilia

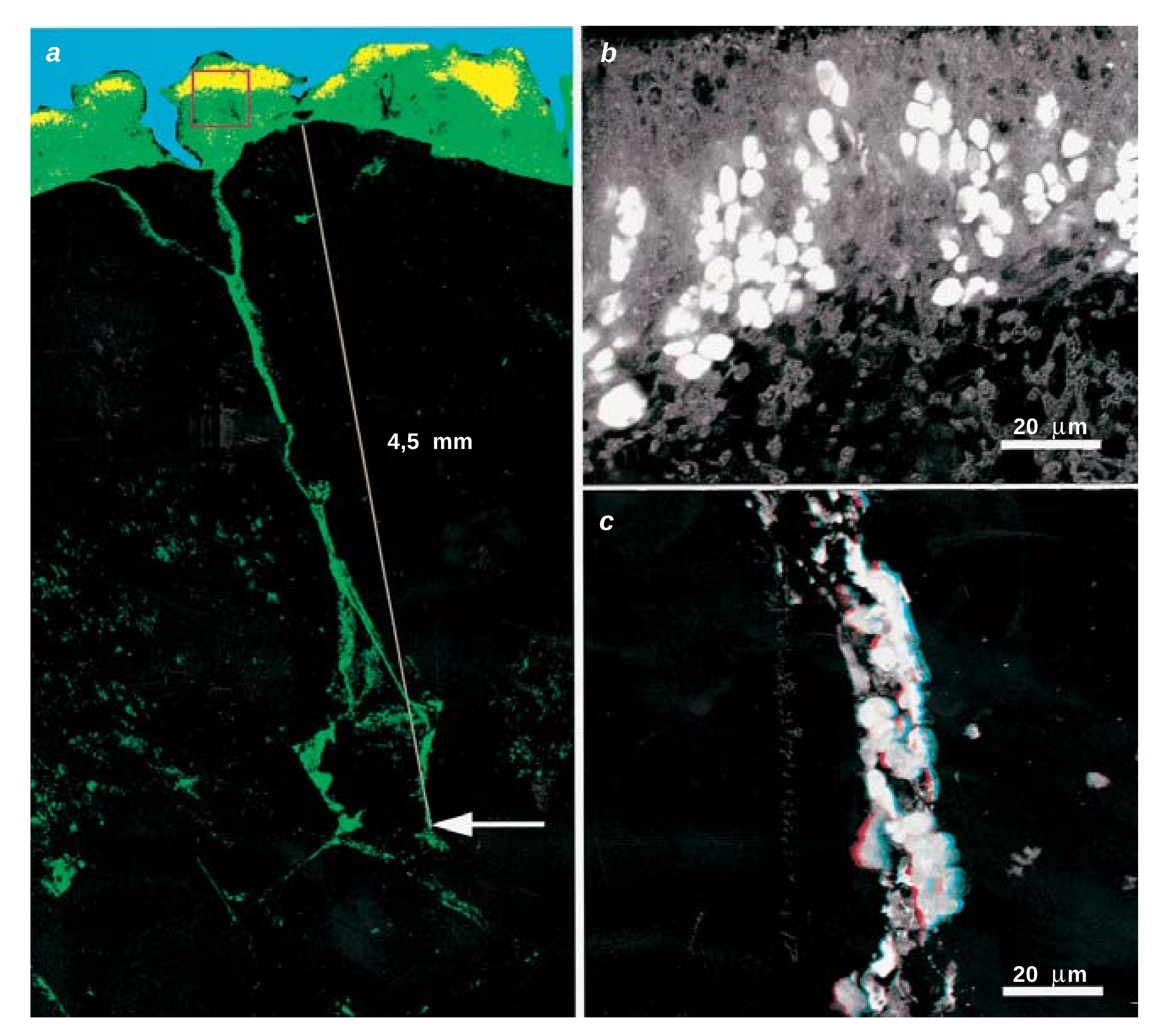
Lo aconsejable es combinar técnicas de crecimiento *in vitro* con técnicas de observación directa de los microorganismos litobiónticos, si queremos hacer diagnósticos fiables de qué es lo que ocurre en el biodeterioro del paramento de un edificio histórico, de una escultura o de una vidriera. Para realizar observaciones *in situ* se ha empleado durante muchos años la microscopía electrónica de barrido ejecutada de un modo que podemos llamar tradicional (detectando únicamente la señal de los electrones secundarios). Con esta técnica se nos revela la presencia de microorganismos, pero sólo podemos apreciar su morfología externa.

Para salvar tales limitaciones, nuestro grupo ha puesto a punto una técnica particular de microscopía electrónica de barrido, que permite la observación de muestras pulidas y fijadas de la zona de interfase liquen-roca. Con nuestro método de microscopía electrónica de barrido en modo de electrones retrodispersados puede llegarse al examen citológico de los talos saxícolas y de los microorganismos litobiónticos, bacterias, cianobacterias, hongos, algas, etcétera, tanto epilíticos como endolíticos, sin necesidad de separarlos de la roca.

Se obtienen secciones transversales al plano de contacto entre el talo liquénico y la roca, con lo que puede observarse la línea de contacto entre el liquen y el material mineral, y conocer la distribución exacta de los fotobiontes en el talo saxícola, la organización de los cristales de oxalato cálcico u otros compuestos, así como el englobamiento por el talo de minerales procedentes del sustrato. Se pueden llevar a cabo observaciones del conjunto talo-sustrato en un área de varios centímetros cuadrados y alcanzar los niveles de resolución necesarios para conocer la ultraestructura de los litobiontes alojados en el interior de las fisuras bajo el talo.

Tras desentrañar la citología de los microorganismos presentes en las fisuras, podemos recurrir a la microscopía láser confocal para descubrir el interior de la fisura en una visión tridimensional y conocer espacialmente la distribución de los litobiontes.

Desde hace varios años, se vienen investigando las posible acciones mecánicas y químicas que ejercen los talos sobre el sustrato rocoso. La acción mecánica parece ejercerse fundamentalmente por los cambios de volumen que experimentan al hidratarse y deshidratarse talos y microorganismos.



2. Mundo del interior de las fisuras de una roca cubierta por líquenes. La imagen a *se ha obtenido observando por microscopio láser confocal la zona de contacto entre un talo de* Aspicilia *y un granito. La zona verde que delimita con el color azul representa la parte superficial del talo; por debajo del talo se aprecian unas fisuras que llegan hasta una profundidad de 4,5 milímetros roca adentro* (negro). *La imagen* b *es una ampliación de la zona recuadrada en* a. *Las esferas blancas son algas o fotobiontes liquénicos y el resto en gris representa a los hongos o micobiontes. La imagen* c *es una visión tridimensional del interior de una fisura donde existen diversos microorganismos litobiónticos (debe observarse con gafas especiales para visión en tres dimensiones)*

Algunos talos liquénicos en los que se ha medido su capacidad de retener agua han mostrado que, al hidratarse, alcanzan hasta un 200 o 300 % de su peso seco.

La microscopía láser confocal muestra cómo cambian los contornos de un talo liquénico entre el estado seco y el hidratado. Al producirse estos cambios, las hifas (que constituyen la mayor parte de la biomasa del talo liquénico) ejercen unas fuerzas que hacen que los minerales que existen bajo el talo se vayan rompiendo y microdividiendo. En el caso de que los organismos litobiónticos estén asentados sobre materiales micáceos u otros minerales laminares, tiene lugar una penetración de los microorganismos entre las láminas de la mica, con la exfoliación consiguiente de la misma.

La acción química queda reflejada en mapas de distribución de elementos, que nos señalan qué elementos de la mica han desaparecido en la zona de contacto entre ésta y los elementos biológicos. A veces ocurren procesos de mineralización de los componentes vivos de la fisura; la cartografía revela entonces que el silicio y otros elementos sustituyen partes de los microorganismos endolíticos.

Todas estas observaciones nos descubren un mundo microscópico, apenas sospechado. Quizá cuando volvamos a ver un tapiz de liquen caigamos ya en la cuenta de la agitada vida que medra en el interior de la roca.

Carmen Ascaso y Jacek Wierzchos
CSIC, Madrid
y Universidad de Lérida

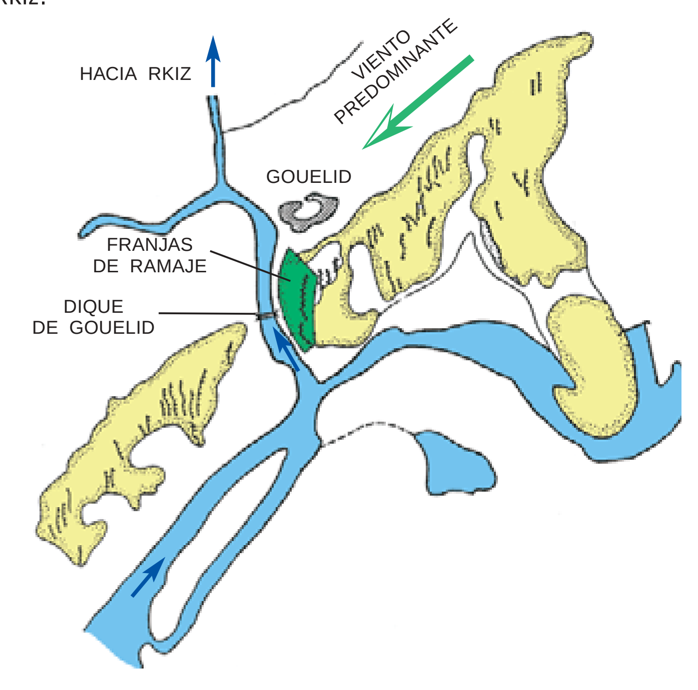
Texto y fotos: Pierre Rognon
Dibujo: G. Forgiarini

La progresión inexorable de las dunas

Mauritania, que carece casi por completo de regadíos, ha depositado grandes esperanzas en el acondicionamiento agrícola de las 12.000 hectáreas de la cubeta de Rkiz, en el sudoeste del país. En la actualidad, esta depresión experimenta inundaciones anuales debidas a excedentes de la crecida del Senegal en período de aguas altas, que llegan hasta ella por un brazo pantanoso del río. La construcción del embalse de Diama, en 1985, va permitiendo la sustitución progresiva de los cultivos de estiaje, que son poco rentables, por cultivos de regadío permanente.

Sin embargo, el proyecto no tuvo en cuenta la progresión de dunas vivas, que empujadas por el viento del nordeste, el *harmattan*, amenazan con invadir y cegar el brazo que lleva las aguas a Rkiz. A decir verdad, la presencia de tales dunas en una región saheliana cubierta de acacias no es corriente; se explica por la degradación extrema de la vegetación provocada por la sobrexplotación de los pastos y los bosques, en un medio cada vez más frágil debido las sequías persistentes que esta región ha conocido durante más de veinte años.

Para oponerse al avance de la arena se han colocado barreras de ramas finamente entrelazadas, situadas a distinto nivel, en sentido perpendicular a la dirección del *harmattan* (*flechas de las fotografías*). Pero este tradicional dispositivo sólo resulta adecuado para detener moderados aportes de arena. En la actualidad, las dunas, ya formadas, se aproximan en oleadas sucesivas (*véase la fotografía 1, a barlovento*) hundiendo rápidamente bajo sí, pese a su densidad, las barreras de ramas instaladas en la última colina antes del brazo muerto [*véase la fotografía 2*]. Sumergidas y rebasadas las barreras [*véase la fotografía 3*] se acercan ya colina abajo hacia el brazo muerto que se divisa al fondo [*fotografía 4*] a sotavento. Será necesario emplear nuevas técnicas para luchar contra estas dunas en movimiento, si no queremos ver perdidas las esperanzas de mejora y aprovechamiento de la cubeta del Rkiz.










2




4

¿Cómo calcula nuestro cerebro?

La observación de nuestro cerebro en actividad pone de manifiesto qué regiones cerebrales están especializadas en el tratamiento aritmético y la forma en que se coordinan sus acciones

Stanislas Dehaene

El matemático Jacques Hadamard publicó en 1945 un ensayo sobre la psicología de la invención en el dominio de las matemáticas. Resumía en él su prolongada indagación sobre la representación mental de los objetos matemáticos, rebuscando pistas en las biografías de sus predecesores, en los testimonios de sus coetáneos de mayor prestigio y en su propia experiencia personal. Dedujo de todo ello interesantes hipótesis relativas a las condiciones psicológicas del descubrimiento en matemáticas.

Su brillante memoria, empero, se cierra con un interrogante. Refiriéndose a las teorías de Franz Joseph Gall, quien postulaba la existencia de un órgano cerebral consagrado al "sentido de las relaciones de los números", Hadamard llegaba a esta conclusión: "Valdría la pena adentrarse en ideas más o menos similares a las de Gall. Pero, ¿cómo hacerlo...? ¿Llegará el día en que los matemáticos sepan lo suficiente sobre la fisiología del cerebro, y en que los neurofisiólogos se encuentren lo bastante al corriente del descubrimiento en matemáticas, para hacer posible una cooperación eficaz?"

El deseo de Hadamard lleva camino de hacerse realidad. Se están investigando los fundamentos cerebrales de las operaciones matemáticas elementales. Con la ayuda de métodos tomados de la psicología cognitiva, de la neuropsicología y de la obtención de imágenes del cerebro, estamos descubriendo las zonas cerebrales activas mientras se efectúan operaciones aritméticas. El autor se ha centrado sobre los entes a un tiempo los más sencillos y más fundamentales de entre los objetos matemáticos, a saber, los números enteros.

El análisis del tiempo que invertimos en la comparación de dos números indica que nuestro cerebro examina las palabras o los números arábigos, expresiones simbólicas, según una representación interna de las cantidades numéricas análoga a una línea, a lo largo de la cual se suceden los números en orden creciente. Esta representación y la manipulación de números utilizan sobre todo un área cerebral, la región parietal inferior. No obstante, atendiendo a la operación aritmética que estemos llevando a cabo, sea una comparación, una resta o una multiplicación, dicha región se activa en uno u otro hemisferio y coordina su actividad con otras áreas especializadas, repartidas por el cerebro, y señaladamente, con las que controlan la producción del lenguaje.

STANISLAS DEHAENE es encargado de investigación en la unidad INSERM 334, en el servicio hospitalario Frédéric-Joliot del CEA en Orsay.

Comparemos dos números

Supongamos que tenemos algunas monedas en el bolsillo y la intención de comprar algunos artículos. ¿Cuánto tiempo necesitaremos para juzgar si su precio excede, o no, de nuestros menguados recursos económicos? En 1967, Robert Moyer y Thomas Landauer, de la Universidad de Stanford, hicieron ver que el tiempo de comparación de dos números es tanto mayor cuanto más cercanos se encuentren: tardamos menos en comparar 8 y 2 que 5 y 6.

Con Emmanuel Dupoux y Jacques Mehler, del Laboratorio de Ciencias Cognitivas y Psicolingüísticas del EHESS y del CNRS, he observado el mismo "efecto de distancia" en la comparación de números de dos dígitos. En uno de nuestros experimentos, hemos estudiado la comparación con 65, que sirvió de referencia fija. La aparición de un número de dos cifras sobre la pantalla de un ordenador ponía en marcha un cronómetro, cuya detención se producía cuando el sujeto experimental respondía "mayor" o "menor" pulsando un botón. Los resultados ofrecen una regularidad llamativa. A medida que el número a comparar se aproxima a 65, el tiempo de respuesta aumenta; los errores siguen una curva similar.

Cuando se reconstruye esta curva mediante un modelo matemático, se descubre que el tiempo de respuesta obedece a una función del logaritmo de la distancia entre los números. Resulta notable que una función logarítmica parecida explique el tiempo que necesita una persona para comparar dos magnitudes físicas, como el peso o la longitud de dos objetos. Diríase, pues, que los números, objetos simbólicos abstractos, parecen tratados por el cerebro humano como magnitudes físicas concretas y continuas. Presentados en forma de una serie de cifras arábigas, serían convertidos mentalmente en una magnitud interna continua, y después, "ponderados" mentalmente.

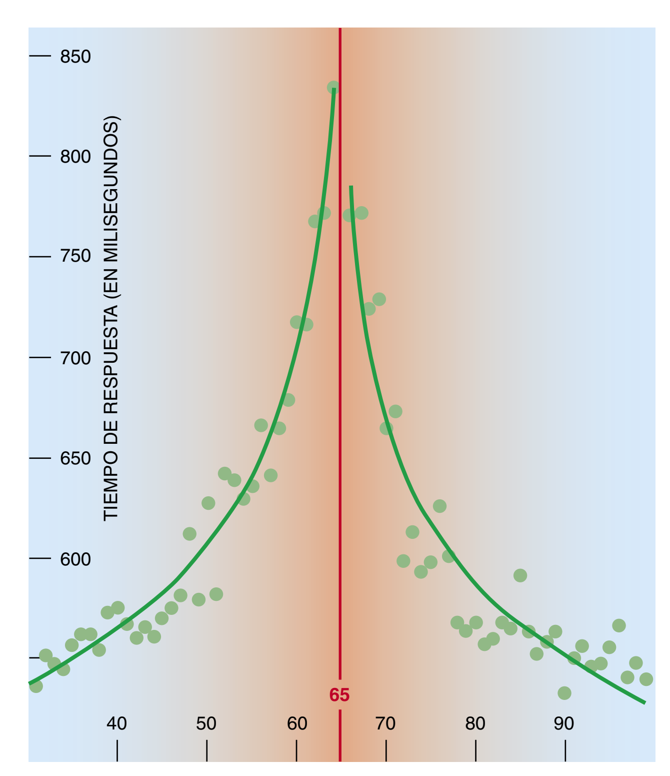
En el caso de números de dos cifras, los resultados de la experiencia de comparación son asombrosos. En un ordenador, el algoritmo más rápido para la comparación de números se basa en el examen sucesivo de sus cifras, de izquierda a derecha. Podemos así determinar que 58 es menor que 65 sin más que comparar los dígitos de las decenas, 5 y 6. Las unidades sólo se tienen en cuenta cuando las cifras de las decenas son idénticas. Pero nuestro cerebro no se atiene a ese procedimiento. Para empezar, la curva de los tiempos de comparación con 65 no presenta discontinuidades especiales en el caso de los números que comienzan por 6; además, el tiempo de comparación



1. LAS REGIONES CEREBRALES activadas dependen de la operación aritmética que se efectúe. Al mismo tiempo que el sujeto ve aparecer en la pantalla de un ordenador cifras que ha de comparar con 5 (*arriba*), que ha de multiplicar por 3 (*centro*) o que ha de restar de 11 (*abajo*), se procede a cartografiar por resonancia magnética el incremento de oxigenación en las regiones activas. Durante la comparación de las cifras, entra en actividad una pequeña región parietal inferior derecha. La multiplicación, en cambio, tan sólo activa la región parietal inferior izquierda. La resta activa simultáneamente estas dos regiones, con extensión e intensidad más pronunciadas. También es visible una importante activación de la región frontal izquierda, relacionada, tal vez, con la utilización de memoria de trabajo. De conformidad con los convenios neurológicos, el hemisferio derecho aparece en la parte izquierda de los cortes anatómicos, como si nos situásemos frente a la persona yacente sobre la espalda.

depende del dígito de las unidades, a pesar de ser superfluo. Por ejemplo, los tiempos de respuesta crecen continuamente entre 51 y 59, por más que la cifra de las decenas baste para saber que tales números son menores que 65.

El algoritmo de comparación que utiliza nuestra mente no descompone los números. El cerebro humano convierte los números pequeños, con los que estamos familiarizados, en representaciones internas sobre una escala continua de cantidades, y compara, a continuación, estas cantidades con independencia de los símbolos que les sirven de vehículos. La continuidad analógica no desaparece sino hasta la comparación de números de más de cuatro dígitos; en tal caso, los sujetos los comparan cifra por cifra, de izquierda a derecha y tanto más rápidamente cuanto más diferentes sean.



2. COMPARAMOS DOS NUMEROS tanto más rápidamente cuanto mayor es su diferencia. El tiempo medio de comparación de un número con 65 depende del logaritmo de su diferencia con dicho número.

Otros experimentos han dado mayor precisión a este "sentido de las cantidades". El efecto de distancia es casi idéntico, se presenten los números en notación arábiga (2), escritos con todas las letras (dos) o dados por un cúmulo de puntos: estas notaciones desembocan, por vías diferentes, en una misma representación abstracta de las cantidades. El efecto sigue siendo observable en tareas en las que no tenemos conciencia de estar efectuando un tratamiento semántico de los números. Cuando decidimos si dos cifras son idénticas o diferentes, lo que no parece exigir sino un análisis visual superficial, somos más lentos cuando las cifras están numéricamente cercanas: tardamos más en decidir que 1 es distinto de 2 que en decidir que 1 es diferente de 9. Incluso en esta situación transformamos los números en cantidades internas.

De igual manera, cuando repasamos una suma, somos tanto más rápidos en responder "falso" cuanto más se aleja de la verdad el resultado. Además, comparamos antes con el 5 la misma cifra 4 tras de una presentación subliminal de la palabra "tres" que después de la de las palabras "uno" o "nueve": la presentación de un número, aunque sea tan breve que no tengamos conciencia de haberlo visto, reduce el tiempo de tratamiento de los números vecinos.

El efecto de distancia constituye, pues, una parte integrante de la comprensión de los números. En cuanto percibimos un símbolo numérico, sea en cifra o en expresión verbal, hablado o escrito, accedemos rápida y automáticamente a la cantidad correspondiente sobre una suerte de "línea" organizada según la proximidad numérica (*véase la figura 3*).

¿En qué lugar de nuestro cerebro se encuentra codificada esta "línea numérica"? ¿Qué regiones cerebrales reconocen la forma de las cifras arábigas y cuáles otras intervienen en la representación de la cantidad? En un principio, fue el examen de enfermos que habían sufrido lesiones cerebrales el que sirvió para precisar las respectivas contribuciones de los hemisferios derecho e izquierdo a la actividad aritmética.

La especialización de los hemisferios

Todo lo que se presenta en la mitad derecha del campo visual se proyecta en el área visual primaria del hemisferio izquierdo, y viceversa. Si fijamos un punto y aparece una cifra a la izquierda de este punto durante menos de dos décimas de segundo, duración insuficiente para que la mirada se reoriente, la cifra tan sólo es "vista" por el córtex visual del hemisferio derecho. En un sujeto normal, la información pasa rápidamente al otro hemisferio vía un espeso haz de fibras, llamado cuerpo calloso. En algunos pacientes, en intervenciones quirúrgicas destinadas a tratar epilepsias rebeldes, se secciona dicho haz: los dos hemisferios cerebrales permanecen intactos, pero imposibilitados de comunicarse. La cifra queda, pues, confinada en un solo hemisferio, y se puede medir la forma en que este único hemisferio efectúa diferentes cálculos.

Así llegaron Michael Gazzaniga y sus colegas de la Universidad de Dartmouth al descubrimiento de que cada uno de los dos hemisferios determina si dos cifras arábigas son idénticas o distintas. La forma de las cifras es, pues, codificada y reconocida de modo independiente en el hemisferio izquierdo y en el hemisferio derecho. La capacidad de identificación del cardinal de un conjunto y de la significación de un número arábigo queda repartida de este modo: los dos hemisferios reconocen, en cierta medida, si una cifra arábiga corresponde o no a un conjunto de puntos (como 3 y ...). Más todavía, cada hemisferio sabe comparar dos cifras y números de dos cifras. Por último, en colaboración con Laurent Cohen, del Hospital de la Salpêtrière, hemos demostrado que cada hemisferio presenta un efecto de distancia cuasi-normal, si bien este último es un poco más pronunciado en el hemisferio derecho que en el hemisferio izquierdo. Cada hemisferio dispone, por consiguiente, de los procedimientos necesarios para la interpretación de un número escrito con cifras como una cantidad y para comparar dos cantidades.

El cerebro, por el contrario, manifiesta una asimetría clara en los dominios del lenguaje y del cálculo. El hemisferio izquierdo parece poseer todas las capacidades aritméticas de un sujeto normal, pero el hemisferio derecho no sabe ni leer en voz alta, ni calcular. Un paciente sin cuerpo calloso, que vea la cifra 4

a la izquierda de su campo visual, a la que, por tanto, trata sólo con su hemisferio cerebral derecho, sabe que este número es menor que 5. Sin embargo, es posible que al leerlo diga “nueve”, y es, por otra parte, totalmente incapaz de multiplicarlo por 3 o de sumarle 8 (*véase la figura 4*).

Tras los trabajos fundacionales de Paul Broca, en el siglo XIX, sabemos que en la mayoría de las personas los procesos de producción del lenguaje hablado sólo se encuentran presentes en el hemisferio izquierdo. Tras la ablación del cuerpo calloso, las áreas del hemisferio izquierdo quedan imposibilitadas de recibir del hemisferio derecho las informaciones referentes a la identidad de la cifra a nombrar. El paciente pronuncia entonces una palabra al azar. De igual forma, al parecer, sólo el hemisferio izquierdo tiene acceso a las tablas de sumar y multiplicar, registradas en forma de palabras puesto que las hemos aprendido recitándolas de memoria.

La mayoría de estos resultados se han obtenido de pacientes sometidos a sección quirúrgica del cuerpo calloso, por ser epilépticos desde la infancia. ¿Es la organización cerebral de estos pacientes idéntica a la de una persona ordinaria? Hemos estudiado el caso de una mujer de 30 años, que era perfectamente normal en el plano neurológico hasta que un accidente vascular cerebral destruyó la parte posterior de su cuerpo calloso. Pudimos observar perfectamente las facultades casi normales de cada uno de sus hemisferios, antes de que tuvieran mucho tiempo para reorganizarse. Ahora bien, al igual que en el caso de los pacientes anteriores, su hemisferio izquierdo era capaz de identificar, comparar, pronunciar, sumar y multiplicar las cifras, mientras que su hemisferio derecho sólo lograba identificarlas y compararlas.

Otra fuente de datos la constituyen los pacientes que sufren lesiones extensas en el hemisferio izquierdo. Las destrezas numéricas de estos pacientes son, aproximadamente, sólo las de su hemisferio derecho. Jordan Grafman, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud en Bethesda, ha estudiado a un antiguo combatiente del Vietnam que había sufrido la pérdida casi completa del hemisferio izquierdo a causa de una ráfaga de ametralladora. Este paciente leía y escribía con muchísima dificultad; era capaz, sin embargo, de comparar números de uno o dos dígitos. Así pues, este hombre comprendía siempre las cantidades asociadas a las cifras. Pero su capacidad de cálculo se detenía en las sumas y restas más elementales, como 2 + 2.

Lesiones selectivas

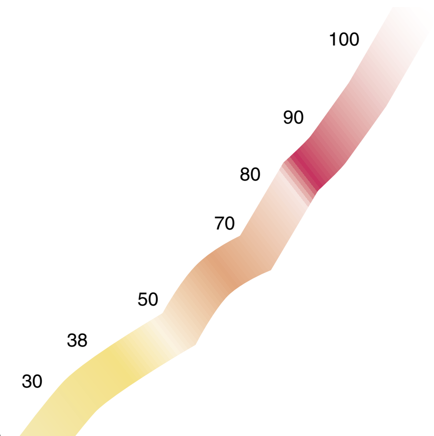
Hemos descrito un caso todavía más espectacular, el de un paciente, N., víctima de una lesión extensa en la región posterior del hemisferio izquierdo. N., que experimentaba enormes limitaciones de lectura, escritura o cálculo, declaraba sin pestañear que 2 + 2 son 3. Conservaba, empero, cierto sentido cuantitativo de los números: podía comparar dos números (aun cuando fuera incapaz de leerlos en voz alta), con un efecto de distancia normal; realizaba asimismo sumas aproximadas, y sabía que 2 + 2 no es igual a 9. N. no parecía representarse las cantidades numéricas sino de manera burda. Sólo conseguía dar respuestas aproximadas a las preguntas más diversas. ¿Cuántos días tiene el año? 350, respondía. ¿Cuántos huevos hay en una docena? 8 o 10. Esta imprecisión le impedía efectuar cálculos exactos, e incluso decidir si un número era par o impar.

Los datos obtenidos de todos estos pacientes demuestran que la identidad de los números y la cantidad aproximada que representan son accesibles por igual a los dos hemisferios. Por el contrario, sólo el hemisferio izquierdo es capaz de enunciarlos en voz alta y emplearlos en cálculos exactos.

¿Qué redes de áreas cerebrales tienen a su cargo, en cada hemisferio, el reconocimiento de las cifras, su lectura y comprensión? Hemos identificado algunas. La forma visual de las cifras arábigas, por ejemplo, es analizada por los circuitos de la vía occipito-temporal ventral de los dos hemisferios: un paciente que sufra una lesión de estas regiones difícilmente consigue leer las cifras; puede, en cambio, escribirlas o repetirlas. En la comprensión y la producción verbal de palabras intervienen las regiones perisilvianas del hemisferio izquierdo; numerosos pacientes que han sufrido lesiones en tales regiones tienen dificultades para enunciar o comprender los nombres de los números que oyen.

En lo que atañe al sentido cuantitativo de los números intervienen las regiones parietales inferiores de ambos hemisferios. Los trabajos de S. E. Henschen en 1919 y 1920, y los de J. Gerstmann en los años cuarenta y, por último, los de Henri Hécaen en el Hospital de la Salpêtrière una década posterior, han establecido que pacientes que sufren lesiones de la región parietal izquierda quedan incapacitados para el cálculo, aunque puedan seguir nombrando y escribiendo los números. De acuerdo con estas observaciones, la región parietal inferior no interviene directamente en la identificación y la producción de números, sino, más bien, en la manipulación interna de cantidades numéricas, siguiendo las reglas de la aritmética.

Los resultados a que nosotros hemos llegado confirman que las lesiones de la región parietal conllevan una pérdida profunda del sentido cuantitativo de los números. Vale la pena describir lo observado en M., un varón de 68 años afectado de una pequeña lesión de la región parietal inferior. M. no experimentaba ninguna dificultad de lenguaje. Leía los números en voz alta y los escribía al dictado. Pero no comprendía el significado de estos números. En la comparación de números, incurría a veces en errores burdos, afirmando, por ejemplo, que 5 es mayor que



3. LA REPRESENTACION mental de cantidades numéricas, que utilizamos inconscientemente en la comparación de números, se parece a una línea orientada en el espacio. Ciertas personas, como es el caso de una mujer joven interrogada por Francis Galton en el siglo XIX, representan conscientemente esa imagen en forma de una cinta coloreada y ondulante.

La doble disociación

La neuropsicología, estudio científico de pacientes afectados de lesiones cerebrales, se funda en el método de la disociación. Sometiendo a los pacientes a pruebas de diversos tipos, se advierte que éstos realizan la tarea *A*, pero no la tarea *B*. Dos pacientes que estudié con Laurent Cohen, en el Hospital de la Salpêtrière, no eran capaces de leer en voz alta pares de números (10 % de éxitos), pero sí podían indicar cuál de dos números era el mayor (100 por ciento de éxitos). Las facultades de lectura (tarea *A*) y de comparación de números (tarea *B*) están disociadas. Resulta entonces tentador concluir que la lesión ha perturbado selectivamente los circuitos cerebrales de la lectura, pero no los de la comparación de números, y, por consiguiente, que estas tareas las realizan regiones cerebrales parcialmente diferentes.

Hay, empero, otras explicaciones posibles. Las tareas *A* y *B*, por ejemplo, podrían utilizar circuitos idénticos, mas, por ser la tarea *A* intrínsecamente más difícil que la tarea *B*, con independencia de cuál haya podido ser la disminución de las facultades intelectuales, los rendimientos en la ejecución de *A* disminuirían con respecto a los de *B*. Así, un error en la percepción de las cifras, por pequeño que sea, perturba su lectura, pero no necesariamente su comparación. Un paciente que leyera el par "31,99" como "cuarenta y uno, noventa y ocho" seguiría mencionando los números en el orden correcto. Además, los porcentajes de error de las tareas *A* y *B* no admiten siempre una comparación directa: un 50 por ciento de éxito en la comparación de números no tendría por qué indicar resultados mejores que la mera respuesta al azar, mientras que un 50 por ciento en la lectura seguiría suponiendo una puntuación honorable, dado que, para números de dos cifras, la probabilidad de responder correctamente [leyéndolas al azar] es sólo del uno por ciento.

Por todas las razones anteriores, los neuropsicólogos buscan la observación de una disociación doble: buscan al menos dos pacientes tales que en la tarea *A* el paciente 2 logre mejor resultado que el 1, mientras que en la tarea *B* sea el paciente 1 quien supere al 2. Ninguna de ambas tareas podría entonces reputarse intrínsecamente más difícil que la otra. Según el emplazamiento de la lesión cerebral, es una u otra facultad la que se resiente. En tales casos, cabe afirmar que se basan en circuitos cerebrales diferentes.

6. También las restas le planteaban dificultades enormes. No llegó jamás a determinar el resultado de 3 – 1: no entendía qué significaba esa operación, y ofreció sucesivamente 7, 5 y 3 como resultados posibles. Le resultaba igual de imposible la bisección de dos números (la determinación de un número equidistante de ambos). ¡Cuando le preguntamos qué número se halla entre 2 y 4, nos propuso el 7!

La lesión de M. estaba situada en su hemisferio derecho, pero nosotros creemos que la organización cerebral de este paciente zurdo era simétrica a la de una persona normal. Margaret Hittmair-Delazer y Brian Butterworth han observado también un paciente similar, que tenía gran dificultad para comparar números, aunque para él era la inversa el efecto de distancia: invertía tanto menos tiempo cuanto más cercanos eran los números y parecía tener que contar incluso para comparar dos números. Su sentido de las cantidades había sufrido, por consiguiente, una profunda perturbación.

Las deficiencias de M. se limitaban, y ello es notable, a números abstractos. Hallaba sin equivocarse la intermedia entre dos letras, entre dos notas musicales, o el mes o día intercalado entre dos meses o dos días de la semana. Manipulaba sin dificultad las fechas o las horas. Sabía determinar qué hora se encuentra entre las 14 y las 16 horas, e incluso era capaz de convertir "las 2 de la tarde" en las "14 horas", o las "20 horas" en "las 8 de la tarde". Las operaciones aritméticas equivalentes, 2 + 12 y 20 – 12, le resultaban, en cambio, imposibles de realizar. Este paciente tan sólo parecía carecer del sentido cuantitativo de los números, que trata de las cantidades abstractas.

Se observó otra disociación interesante entre las operaciones aritméticas. M. experimentaba enormes dificultades en la bisección y en la resta (77 y 75 por ciento de errores, respectivamente); le resultaba más fácil, en cambio, realizar sumas (32 por ciento de errores) y multiplicaciones (25 por ciento de errores) con las mismas cifras. Enunciaba en voz alta el resultado de una multiplicación sin que, al parecer, comprendiera el significado del enunciado. Esta observación confirma la hipótesis de que las tablas de sumar y multiplicar, que se cantan de memoria en la escuela elemental, quedan impresas en circuitos cerebrales ligados a los del lenguaje y son parcialmente independientes de la representación cuantitativa de los números, ubicada en la región parietal. Esta segunda representación, en cambio, es necesaria para la resta, que no se aprende de memoria, y exige tratar con las cantidades.

La multiplicidad de circuitos de la multiplicación

Hemos observado una disociación inversa a la de M. en el caso de B., una institutriz jubilada víctima de una lesión subcortical del hemisferio izquierdo. Esta señora no conseguía recitar ni las tablas de multiplicar, ni el alfabeto, ni siquiera el *Tengo una muñeca vestida de azul*. ¡Sí era capaz, en cambio, de restar, comparar o bisecar dos números! Esta doble disociación pone de manifiesto que la región parietal inferior no desempeña una función genérica en la aritmética: no aloja ni la célebre "protuberancia matemática" ni el "sentido de la relación de los números", nociones tan queridas de Gall y de los frenólogos. A lo más, esta región contiene, en los dos hemisferios, una codificación de los números en forma de cantidad, mientras que otros circuitos especializados contribuyen a la codificación de la tabla de multiplicar, de las fechas, las horas e incluso del álgebra.

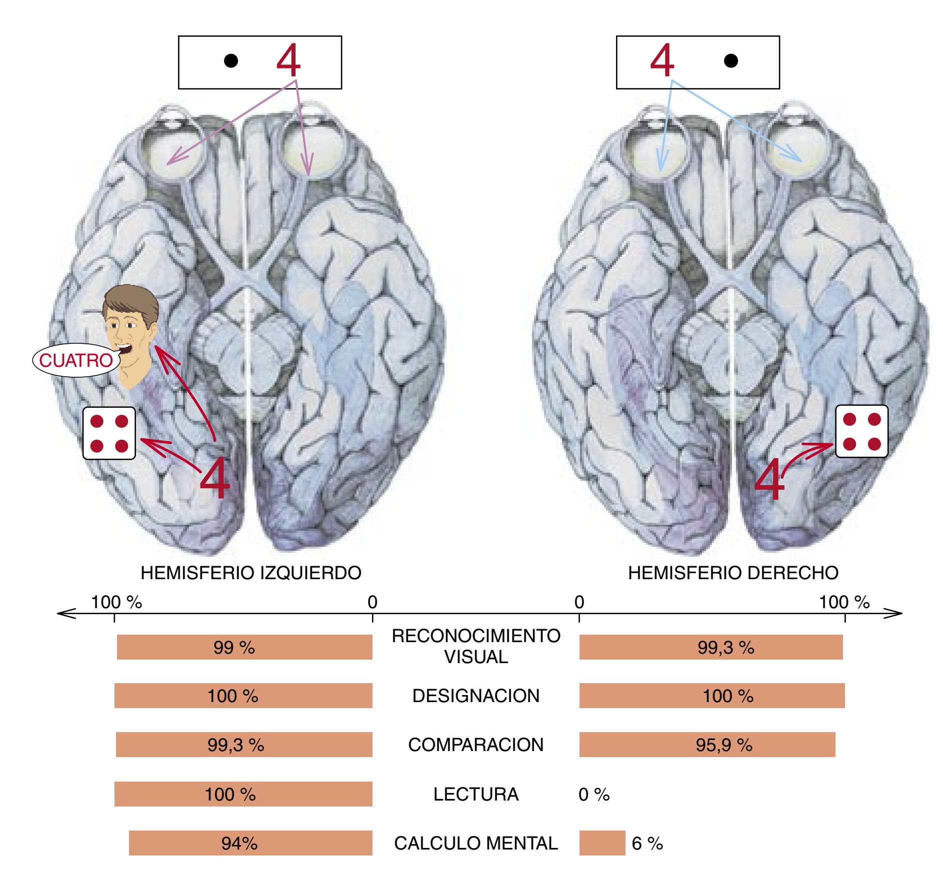
La existencia de tales circuitos, y la función concreta de la región parietal inferior en la manipulación de las cantidades, quedan confirmadas por observaciones directas del cerebro mientras se encuentra calculando. Cuando un circuito cerebral entra en actividad se produce, algunos segundos después, un aumento local del riego sanguíneo y de la tasa de oxigenación de la sangre en los vasos que irrigan las regiones cerebrales activas. Este incremento, confinado al interior de la caja craneana, puede percibirse desde el exterior por inyección de un trazador radiactivo que se acumula preferentemente en las regiones ac-

tivas, y cuya distribución espacial se reconstruye a partir de las radiaciones emitidas por ellas, medidas por una cámara de positrones.

P. Roland y L. Friberg, de la Universidad de Copenhague, han observado de este modo la actividad cortical en el caso de restas repetidas de 3 en 3 (50 – 3 = 47, 47 – 3 = 44, 44 – 3 = 41, etc.). Se produce una intensa actividad bilateral de la región parietal inferior, acompañada de una actividad en los lóbulos frontales asociada, sin duda, a la memorización de resultados intermedios. Estos resultados se han reproducido en imágenes funcionales de resonancia magnética, técnica con que se mide el estado de oxigenación de las moléculas de hemoglobina de la sangre. Incluso en el caso de restas sencillas, como 11 – 4, observamos una activación intensa que se extiende varios centímetros a lo largo del surco intraparietal, después, al fondo del surco poscentral, llegando a la región parieto-occipital. Son, pues, varias las regiones cerebrales verosímilmente activas.

Nos hemos centrado en la medición sistemática de la actividad cerebral en el transcurso de diversas tareas aritméticas (lectura, comparación, adición, sustracción, multiplicación). De acuerdo con los primeros resultados, la corteza parietal derecha se activa durante la comparación de números; la multiplicación da lugar a una actividad reducida y casi exclusivamente localizada en el hemisferio izquierdo, mientras que la sustracción provoca activaciones bilaterales. Un trabajo precedente había demostrado que otra región, el núcleo lenticular izquierdo, se activa más intensamente durante los procesos de multiplicación que en los de comparación de unos mismos números. ¡Ahora bien, esta región subcortical era precisamente la que había provocado en el caso de B. la pérdida de la memoria de las multiplicaciones! En consecuencia, la convergencia de resultados obtenidos con pacientes y con sujetos normales determina con precisión los circuitos asociados con cada operación.

¿Está la región parietal subdividida a su vez en varias subregiones especializadas en números de distintos tamaños? Lisa Cipolotti, Brian Butterworth y Gianfranco Denes han observado una paciente incapaz de comprender cifras mayores que 4, en la que se había preservado el significado de los números 1, 2, 3 y 4. No es imposible que los números pequeños y los grandes se encuentren



4. LOS DOS HEMISFERIOS CEREBRALES poseen distintas capacidades aritméticas. Ambos identifican visualmente las cifras y saben qué cantidades representan, pero tan sólo el hemisferio izquierdo accede a la pronunciación y la recordación de las tablas aritméticas. Los diagramas indican las puntuaciones conseguidas en varias tareas por un paciente al que se le había seccionado el cuerpo calloso, que conecta ambos hemisferios: las cifras presentadas en la mitad izquierda o la mitad derecha del campo visual son tratadas exclusivamente por el hemisferio opuesto. El paciente sabe decir en todos los casos si dos cifras son idénticas, señalar con el dedo en un cuadro las cifras correspondientes o compararlas con 5; sin embargo, no puede leerlas en voz alta ni utilizarlas en cálculos mentales hasta que no alcanzan su hemisferio izquierdo.

representados en regiones cerebrales parcialmente diferentes.

Las etapas del cálculo

La cartografía de las zonas cerebrales y de sus funciones, por precisa que sea, no basta para comprender los mecanismos cerebrales del tratamiento de números. Hemos de conocer también el desarrollo cronológico de estos fenómenos. ¿En qué orden, y con qué velocidad, se vuelven activas estas regiones?

La resolución cronológica de las imágenes tomadas por la cámara de positrones o por la resonancia magnética está limitada por el tiempo de establecimiento de la circulación sanguínea en las regiones activas, que es de varios segundos. En cambio, la descarga simultánea de docenas de millares de neuronas de una región cerebral en actividad produce una diminuta corriente eléctrica, que se detecta en milésimas de segundo mediante encefalografía, por aposición de electrodos sobre el cuero cabelludo. La contrapartida de esta excelente resolución temporal está en la pérdida de resolución espacial: las señales eléctricas medidas en la superficie del cuero cabelludo son a veces ambiguas en lo que concierne a la posición de las regiones activadas.

He reconstituido como sigue la secuencia cronológica de las activaciones cerebrales que tienen lugar al comparar dos números (*véase la figura 5*). He medido la actividad eléctrica del cerebro mediante 64 electrodos repartidos por la superficie del cuero cabelludo de una persona, mientras ésta comparaba el 5 con cifras arábigas (1, 4, 6 o 9) y con

nombres de números (uno, cuatro, seis o nueve).

Al cabo de unos 100 milisegundos de la aparición de un número en la pantalla, la presencia de un potencial eléctrico positivo en los electrodos posteriores indica la activación del área visual primaria. Un poco después, hacia los 150 milisegundos, se aprecia una diferencia topográfica, según que se haya presentado una cifra arábiga o el nombre de un número: son identificados por redes anatómicas diferentes. Las regiones occipito-temporales ventrales de los dos hemisferios reconocen las cifras; para las palabras, sólo interviene la región izquierda. Pero en este estadio no es notable ningún efecto de distancia; se reconoce la identidad de los símbolos, no su significado.

El efecto de distancia aparece hacia los 190 milisegundos. Los sujetos son sistemáticamente más lentos con las cifras 4 y 6 que con las cifras 1 y 9. Por otra parte, el potencial medido en los electrodos situados para examinar la corteza parietal inferior varía en función de la diferencia entre el número y 5. Añadamos, por último, que la topografía de este efecto es similar para los números escritos en símbolos arábigos o con todas sus letras, lo cual confirma que la región parietal inferior no codifica los números en forma de símbolos en una numeración determinada, sino en un código cuantitativo abstracto e independiente de la notación de entrada.

Seguimos asimismo las etapas ulteriores del tratamiento de la información. A partir de los 250 milisegundos aparece la primera diferencia significativa entre las respuestas "mayor" y "menor", que el sujeto da pulsando respectivamente con la mano derecha o con la izquierda. A partir de este momento, tan sólo un cuarto de segundo después de la presentación del número, el sistema motor comienza a enterarse de la respuesta correcta. La activación motriz, empero, no culmina sino hacia los 330 milisegundos, y la respuesta propiamente dicha no se produce, por término medio, sino hasta los 400 milisegundos. Después, hacia los 470 milisegundos, se observa la activación de una nueva área cerebral, la región cingular anterior, que desempeña cierto papel en el control de otros circuitos cerebrales. En cuanto el sujeto comete un error, esta región se activa para detectarlo y tratar de corregirlo. Se aprecia entonces un relanzamiento de la actividad eléctrica concomitante de la respuesta inicial.

Esta cadena de acontecimientos —identificación de la cifra, comprensión por la región parietal inferior y consiguiente respuesta motriz— corresponde a lo que podemos deducir de la cartografía de regiones cerebrales. La electroencefalografía permite precisar la duración de las distintas etapas.

Experiencias similares revelan, además, que al presentar dos veces seguidas la misma cifra en la tarea de comparación, la etapa de identificación va seguida directamente de la respuesta motriz, sin efecto de

a

RECONOCIMIENTO DE LAS CIFRAS ARABIGAS 150 MILISEGUNDOS

b

RECONOCIMIENTO DE LAS PALABRAS 150 MILISEGUNDOS

c

COMPARACION 190 MILISEGUNDOS

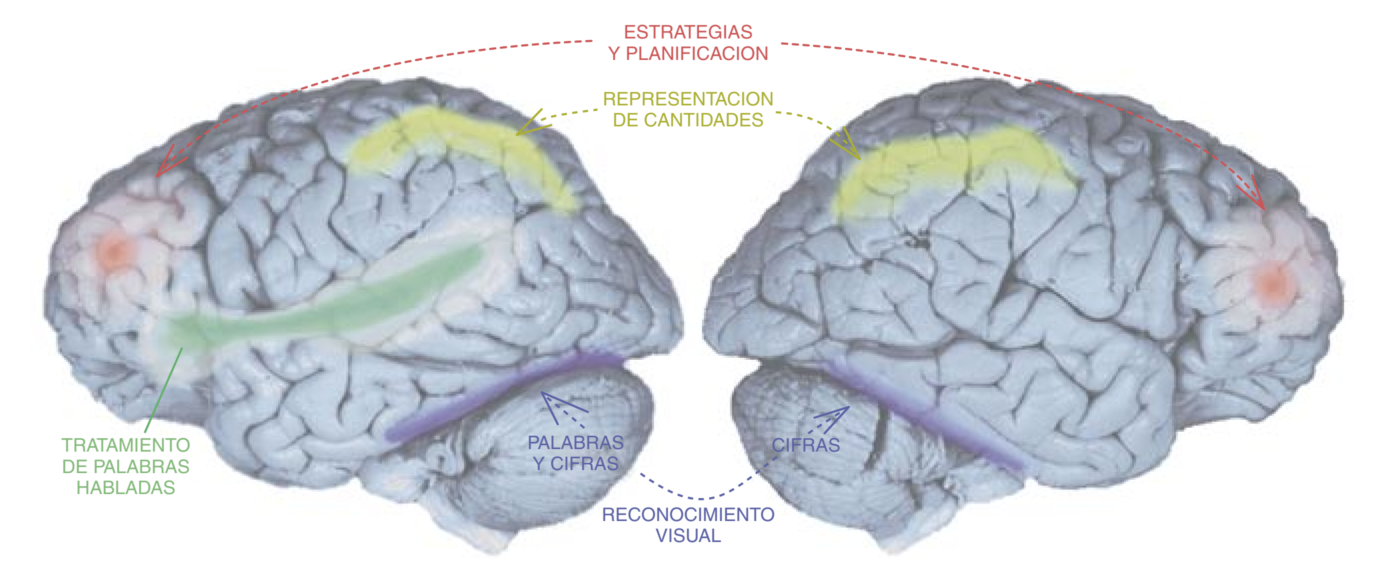
d

RESPUESTA 330 MILISEGUNDOS

e

CORRECCION DE ERRORES 470 MILISEGUNDOS

5. LA SECUENCIA DE ACTIVACION CEREBRAL en el transcurso de la comparación de cifras con el número 5 se desarrolla según cuatro etapas, por lo menos. Las variaciones de potencial eléctrico en la superficie del cerebro (*izquierda*) reflejan la actividad de las regiones cerebrales subyacentes e indican en qué instantes entran en actividad las distintas regiones cerebrales (*derecha*). El reconocimiento de la cifra o la palabra se produce en 150 milisegundos (*a* y *b*); la comparación ha sido realizada ya hacia los 190 milisegundos, con activación de la región parietal inferior (*c*). Al cabo de 330 milisegundos, la persona pulsa el botón de la respuesta (*d*). Hacia los 470 milisegundos se activa la región cingular anterior (*e*), con el fin de corregir un posible error.



6. VARIAS REGIONES CEREBRALES podrían participar en el tratamiento de información numérica. En el modelo considerado, el reconocimiento visual activa la región occipito-temporal ventral (*azul*), en el hemisferio izquierdo en el caso de palabras escritas y en ambos lados en el caso de cifras arábigas. El reconocimiento y la producción de palabras habladas activan la región perisilviana del hemisferio izquierdo (*verde*). Las cantidades numéricas se representan en la región parietal inferior de los dos hemisferios (*amarillo*), especialmente, en lo profundo del surco intraparietal. Interviene por último la corteza prefrontal (*rojo*) para memorizar los resultados intermedios y controlar las estrategias puestas en juego en las regiones posteriores. Todas esas regiones se intercambian información en un cálculo.

distancia y, por así decirlo, sin activación de la región parietal inferior. Los sujetos detectan la repetición, recuerdan la respuesta y la repiten. Todavía es de mayor interés que, al multiplicar dos cifras, si la multiplicación es simple, como en 2×3, la activación parietal está fuertemente lateralizada a la izquierda y es de corta duración. Por contra, si la multiplicación es menos familiar, por ejemplo 8×7, parece arrancar en el hemisferio izquierdo antes de extenderse a la región parietal derecha durante algunos centenares de milisegundos. El tamaño de los números manipulados y la naturaleza de las operaciones efectuadas sería, pues, un condicionante de los caminos del cálculo en nuestro cerebro.

La existencia de regiones cerebrales especializadas en el tratamiento de los números plantea el problema de su origen. ¿Se encuentra ya parcialmente operativa la región parietal inferior en el niño pequeño, confiriéndole ya un sentido aproximativo de las cantidades? Seres tan dispares como la rata, la paloma, el delfín, el chimpancé y el bebé humano de pocos días, aunque desprovistos de lenguaje, se representan mentalmente el cardinal de un conjunto de objetos visuales o sonoros, e incluso efectúan ciertas deducciones aritméticas elementales. Un bebé de cuatro meses y medio espera que un conjunto de dos objetos del que retiramos uno no contenga más que uno solo: efectúa mentalmente una analogía, con objetos concretos, de la operación aritmética abstracta $2 - 1 = 1$. Pudiera ser que existieran desde el nacimiento circuitos cerebrales predeterminados para la representación de cantidades, con independencia de toda educación matemática. El aprendizaje y recitado de los nombres de los números ("uno, dos, tres...") y de la forma visual de las cifras arábigas ("1, 2, 3...") permitiría entonces la ulterior asociación de sistemas de numeración simbólica a este "sentido de las cantidades", con lo que el niño aprendería a poner en relación la palabra "cuatro", la cifra "4" y la cantidad ": :"

Con independencia de la validez de este esquema, sí aflora un principio general de organización cerebral: la modularidad de las redes. Sin tener consciencia de ello, docenas de áreas cerebrales especializadas, repartidas por los dos hemisferios, se activan al practicar nosotros el cálculo mental. La información pasa sin esfuerzo de las representaciones visuales, especializadas en la identidad de las cifras, a las áreas del lenguaje, en las que los números se cifran en forma de cadenas de palabras, y a las áreas del "sentido cuantitativo" en las que vuelven a encontrarse sus cantidades y sus relaciones de proximidad. Aunque estamos comenzando a percibir los nudos principales de esta red, quedan abiertas dos cuestiones. ¿Cuáles son los mecanismos que aseguran la coherencia de las informaciones numéricas distribuidas y nos producen la impresión subjetiva de estar efectuando un cálculo? ¿De qué forma van cediendo su lugar estos mecanismos de cálculo elementales, al hilo de la educación matemática, a representaciones cerebrales mucho más elaboradas de los objetos, llegando a la extraordinaria fluidez calculatoria de un Einstein, un Poincaré o un Ramanujan? Tal vez Hadamard, de tener conocimiento de estas preguntas, se sintiera frustrado al comprobar que las cuestiones fundamentales siguen sin respuesta. Pero experimentaría cierta satisfacción al ver que sus métodos introspectivos se han reemplazado por sólidas técnicas experimentales emanadas de la biología y la psicología cognitiva.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ESSAI SUR LA PSYCHOLOGIE DE L'INVENTION DANS LE DOMAINE MATHÉMATIQUE, J. Hadamard, Éditions Gauthier-Villars, París, 1975.

TOWARDS AN ANATOMICAL AND FUNCTIONAL MODEL OF NUMBER PROCESSING. S. Dehaene y L. Cohen, en *Mathematical Cognition*, número 1, páginas 83-120, 1995.

LE CERVEAU SOCIAL, M. Gazzaniga, Éditions Odile Jacob, París, 1996.

LE CERVEAU EN ACTION: L'IMAGERIE CÉRÉBRALE EN PSYCHOLOGIE COGNITIVE, bajo la dirección de S. Dehaene, Presses Universitaires de France, París, 1997.

LA BOSSE DES MATHS. S. Dehaene, Editions Odile Jacob, París, 1997.

Arqueología de la era espacial

Con las técnicas de detección remota las excavaciones se hacen menos imprescindibles al poderse explorar yacimientos ocultos y examinar artefactos enterrados sin extraerlos

Farouk El-Baz

La "media luna vacía" de Arabia, la región llamada al-Rub'al-Jālí, es puro desierto. Este territorio inmenso y yermo, que se extiende unos 777.000 kilómetros cuadrados, detestables por su hostilidad, carece de vida. Quiere la tradición que el paisaje ofreciera condiciones mucho más gratas en un pasado reciente. Oye el viajero hablar de la ciudad perdida de Ubar, oasis legendario de la ruta del comercio de resinas aromáticas (incienso), descrito en el Corán como la "Ciudad de las columnas". El propio T. E. Lawrence tenía la esperanza de hallar esta "Atlántida de las arenas". No lo consiguió, pero la búsqueda prosigue en nuestros días.

Imágenes tomadas por la lanzadera espacial y por satélites Landsat han revelado una configuración de finas líneas convergentes hacia un punto cobijado entre las dunas de este desierto misterioso, que alcanzan una altitud de 200 metros. Los investigadores que examinaron las imágenes han conjeturado que el cubo de esos radios misteriosos pudiera ser un cementerio o una ciudad, y han relanzado la búsqueda de Ubar. En 1990 y 1991 se organizaron expediciones a la zona; las excavaciones realizadas cerca de una pista están ya sacando a la luz las estructuras, largamente ocultas, de una ciudad amurallada.

En el otro lado del mundo, los medios técnicos punteros han conducido a los científicos hasta los restos de una era antigua muy diferente. Esta vez los indicios se debieron a un tipo de radar capaz de penetrar en el subsuelo: un instrumento que emite ondas de radar dirigidas hacia la tierra y registra los ecos que ésta devuelve. Los distintos tipos de ecos revelan las diferentes capas de suelo y roca, o, en este caso, los restos fósiles de dinosaurios. Los paleontólogos han excavado en el desierto de Nuevo México los restos de uno de esos colosos herbívoros capaces de hacer temblar la tierra llamados sismosaurios.

Instalado en el espacio o en la superficie terrestre, el instrumental telemétrico está empezando a integrarse en la utillería arqueológica normal. No pocos arqueólogos, adiestrados para el manejo de pico y pala, y para sostener en sus manos los artefactos que describen, se sienten incómodos con estas técnicas. Mas quienes se valen del instrumental de detección remota están acumulando ya una profusión de indicios y pruebas tan nuevas como insólitas. Y un aspecto, quizá no menos importante: se han podido reunir conocimientos impagables sin perturbación ni deterioro de yacimientos frágiles, requisito con el que hay que contar cada vez más en nuestros tiempos, que exigen la conservación de lo existente.

Aunque la fotografía aérea existe desde los primeros años del siglo, la percepción a distancia de la Tierra nació en diciembre de 1968, al teledifundir los astronautas del *Apolo* la panorámica de la Tierra desde la vecindad de nuestro satélite. Pudimos contemplar cómo se elevaba sobre el horizonte lunar aquella hermosa esfera azul recortada contra el vacío oscuro del espacio. Los astronautas de misiones posteriores comentaron cómo habían visto serpear la Gran Muralla a través de las tierras montañosas de China y a la Gran Pirámide adornar con donosura la llanura de Gizéh, al oeste del Nilo. Comenzaba a aflorar una nueva forma de examen de la Tierra. Los investigadores se pusieron a reflexionar en formas de reconocimiento de estructuras y paisajes desde gran distancia, con ayuda de técnicas refinadas, y de cómo podrían éstas revelarles detalles ocultos.

En 1972, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio puso en marcha el programa Landsat, orientado a la exploración y el estudio de regiones agrícolas. De los registros de la intensidad de la radiación de rayos infrarrojos reflejados por la vegetación, los científicos podían deducir valores estimativos de los rendimientos de las cosechas. Cuanto más sanos estaban los cultivos de trigo, por ejemplo, más intensa era su reflexión infrarroja. La Tierra era visible ahora, en el espectro electromagnético, como un tapiz de brillantes tonos rojos, amarillos, azules y verdes. Los investigadores percatáronse gradualmente de que estas imágenes podían ser valiosas en otras disciplinas, en particular, en geología, geografía y arqueología. A finales de los años setenta, había ya un puñado de arqueólogos utilizando las imágenes del Landsat, tratando de localizar la ubicación de las ruinas mayas en las densas junglas de la península del Yucatán o estructuras antiguas en las llanuras mesopotámicas.

Ya en los años ochenta, algunos arqueólogos familiarizados con el sistema Landsat empezaron a utilizar imágenes de resolución todavía mayor. Thomas L. Sever y Payson D. Sheets desarrollaron las posibilidades de la técnica. Tras solicitar la instalación en aviones de sensores infrarojos, registraron una "línea extraña, retorcida" en la zona de

1. REGION de la Península Arábiga que circunda el lugar que pudo ser enclave de la ciudad perdida de Ubar. Dicho emplazamiento, demasiado pequeño para ser detectado aquí, se halla cerca del centro, en la convergencia de varias líneas rojas. Esta imagen de radar, que cubre un área de unos 50 por 85 kilómetros, fue tomada en 1994 por la lanzadera espacial *Endeavour*, mediante el sistema de radar SIR-C.



Pistas y senderos discernibles en las venas rojizas. Utilizadas en tiempos modernos, sabemos ahora que por muchas de ellas se viajó también hace miles de años.

Un wadi de buen tamaño, lecho seco de un río, aparece blanco, por la aspereza de su superficie, que provoca una intensa difusión de retorno.

Las regiones verdes indican piedra caliza desnuda y agreste, que forman un suelo desértico rocoso.

Enormes dunas de arena se extienden a lo ancho de las regiones de color morado.

Tilarán, en Costa Rica noroccidental. Las fotografías tomadas en la banda de los infrarrojos parecían indicar que la línea atravesaba valles y colinas. Sever y Sheets apuntaron la sospecha de que no se tratara de un accidente natural, sino de una carretera prehistórica. Estaban en lo cierto. El trabajo de campo demostró la existencia de senderos con una antigüedad de 1000 a 2000 años, que conectaban cementerios, poblados y pedreras.

Aunque las pistas y carreteras antiguas eran ya observables en imágenes de satélite —como en el caso de la "media luna vacía" de Arabia— los detalles revelados por la fotografía aérea en infrarrojos resultaron todavía más precisos. Sever y Sheets no tuvieron gran dificultad en hallar las estructuras cuando partieron a pie. Por el mismo procedimiento Sever identificó más tarde pistas prehistóricas en el cañón del Chaco, Nuevo México, demostrativas de que la civilización del Chaco no vivía aislada, sino integrada en una vasta red comercial del suroeste de América del Norte.

En 1986, un organismo francés, el Centro Nacional de Estudio del Espacio, propició el hito siguiente en la detección remota desde satélite: la creación del sistema SPOT. Las imágenes multiespectrales de este sistema captaban objetos o áreas de 20 metros de anchura; los datos pancromáticos registraban objetos de sólo 10 metros. (En comparación, los sensores de los tres primeros Landsat sólo alcanzaban a detectar objetos de un tamaño de 80 o más metros; los de las dos misiones posteriores resolvían ya elementos de sólo 30 metros.) Las imágenes SPOT no presentan tanto detalle como las fotografías aéreas; cubren, a cambio, áreas mucho más amplias, lo que permite investigaciones regionales. James R. Wiseman ha estudiado imágenes SPOT del paisaje de Grecia noroccidental y ha descubierto el antiguo litoral de la bahía de Ammoudhia, sede antaño de un puerto importante, hoy desaparecido. Ha cartografiado la red de canales de agua del mar que penetraban tierra adentro, así como antiguas caletas.

El principal instrumento ofrecido a la arqueología pudiera ser el radar de formación de imágenes. Su excepcional capacidad para penetrar bajo las arenas del desierto y poner de manifiesto la antigua topografía

Detección remota desde el espacio...

Landsat Tres de estos satélites, destinados a la adquisición de imágenes digitales, fueron lanzados en órbitas cuasipolares, allá por los años setenta. Los satélites, dotados de escáneres multiespectrales, medían la radiación reflejada por la superficie terrestre en cuatro bandas del espectro electromagnético. Los escáneres transmitían los datos a estaciones instaladas en suelo firme.

Cartógrafo temático Este instrumento iba a bordo de los Landsat 4 y Landsat 5, en los años ochenta. Su sensor obtenía imágenes con una resolución de 30 metros en siete bandas espectrales: tres en el espectro visible (azul, verde y roja), una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarojo térmico. En consecuencia, las imágenes del cartógrafo podían detectar una gama más amplia de variaciones en la respuesta espectral de los materiales de la superficie.

SPOT A diferencia de los Landsat, que eran experimentales, esta serie de satélites de adquisición de imágenes se proyectó para ser plenamente operativa. Si los Landsat exploraban la escena con un espejo móvil, los sensores SPOT se valen de una técnica de matriz lineal, que aporta mayor fidelidad geométrica a las imágenes. Además, el sistema tiene equipos ópticos orientables, que permiten la visión lateral para la preparación de vistas estereoscópicas.

Radar Los instrumentos del radar de imágenes emiten microondas en dirección a la superficie terrestre y registran los ecos. Los ecos producidos por terrenos rocosos son en la imagen, por lo general, intensos, o "brillantes"; los producidos por superficies lisas son débiles, u "oscuros". Se pueden utilizar diversas combinaciones de polarización y longitud de onda para producir imágenes en color que resalten aspectos determinados. Además, las imágenes de radar refuerzan los rasgos lineales, como fallas y escarpaduras. Mostraron, por ejemplo, varias generaciones de un segmento de la Gran Muralla de China que se les habían pasado por alto a otros sistemas de obtención de imágenes.

Corona El gobierno estadounidense ha desclasificado hace poco las fotografías obtenidas por "satélites espías" entre 1960 y 1972. Estas tomas en blanco y negro tienen resoluciones que llegan al metro. Su capacidad de ofrecer vistas estereoscópicas permite mediciones sencillas de las elevaciones del terreno, una información de interés en la investigación arqueológica. Es posible que los satélites comerciales puedan pronto obtener imágenes desde el espacio con resolución de 1 metro. Cuatro consorcios industriales proyectan lanzar y gestionar sistemas capaces de proporcionar datos de este tipo.



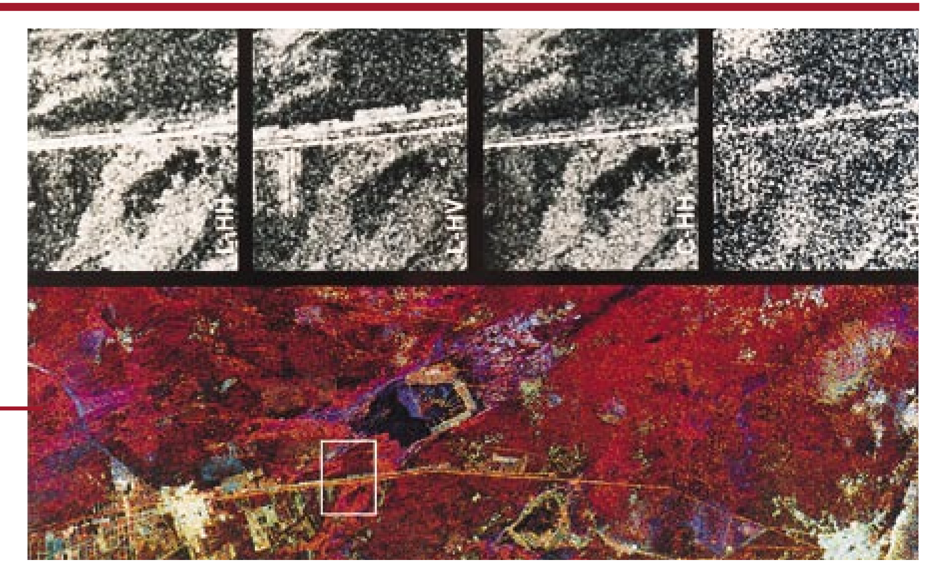








2. UN CACICATO constructor de montículos, estudiado por Anna C. Roosevelt, se encuentra en la desembocadura del río Amazonas (*arriba, a la izquierda*). Instrumentos portátiles de detección remota (*tres de ellos, a la derecha*) ayudaron a Roosevelt a discernir la ubicación y la naturaleza de los montículos. Con los datos recogido esbozó un modelo del yacimiento (*abajo, a la izquierda*).



3. TRAMO DE LA GRAN MURALLA de China, visible en la fina banda naranja (*abajo*). Las imágenes en blanco y negro corresponden al área limitada por el recuadro blanco y representan los cuatro canales de radar de SIR-C. Las dos imágenes de la izquierda proporcionan la visión más clara de dos generaciones de la muralla: la línea continua brillante corresponde a la muralla más reciente, construida hace unos 600 años; por encima mismo de ella, la línea brillante discontinua es un residuo de una versión más antigua de la muralla (de hace unos 1500 años). La muralla se detecta sin dificultad por radar desde el espacio, porque sus lados, empinados y lisos, proporcionan una superficie prominente para la reflexión del haz radárico. La detección radárica de la antigua muralla facilita el rastreo de la antigua ubicación de la estructura en zonas vastas y remotas. La imagen inferior, tomada por la *Endeavour* en 1994, nos muestra un área de unos 25 por 75 kilómetros.

... y sobre la Tierra

Equipos de sondeo electromagnético Estos instrumentos miden diferencias en las propiedades eléctricas o magnéticas entre la superficie y el subsuelo, amén de otras características, como la existencia de rocas o de paredes enterradas. Su sensibilidad alcanza hasta unos seis metros de profundidad. Se acude a estos dispositivos para preparar mapas de las capas del terreno o de cavidades en el subsuelo.

Radar de penetración subterránea Este radar de baja frecuencia está capacitado para "ver" el subsuelo. El radar habitual utiliza microondas, que apenas se adentran unos pocos centímetros en la mayoría de los terrenos. El radar de penetración subterránea, sin embargo, se vale de frecuencias más similares a las utilizadas por las estaciones de FM y de televisión, lo que permite que las ondas viajen, normalmente, hasta 10 metros bajo la superficie. Cuando estos impulsos electromagnéticos perforan el suelo, atraviesan diversas capas de mantillo, arena, arcilla, piedra o materiales creados por humanos. Cada interfase entre estas capas produce un eco. Cuanto más profunda se encuentre la frontera, más tarda el eco en retornar a la superficie, lo que indica la profundidad del objeto.

Magnetómetros Estos instrumentos identifican peculiaridades subterráneas que poseen una magnetización distinta de la del suelo circundante. El "magnetómetro de protones" —que es el tipo más frecuentemente utilizado por los arqueólogos— mide cambios sutiles de magnetización, en especial, los provocados por la presencia de un horno o fogón.

Instrumentos de resistividad Introducen electrodos en el suelo y miden la diferencia de potencial eléctrico entre ellos. Cuando los investigadores mueven los electrodos a lo largo de un yacimiento, registran las diferencias en resistividad, que son indicio de artefactos enterrados.

Instrumentos sísmicos Los arqueólogos utilizan sismógrafos muy similares a los que detectan y registran las vibraciones producidas por los terremotos. Estos instrumentos, sin embargo, son sensibles a ondas sonoras generadas artificialmente. El movimiento y el tiempo de tránsito de una onda y de sus ecos son registrados en cuadros, que van, acumulativamente, presentando una imagen sísmica de la subsuperficie. Los instrumentos sísmicos llegan a profundidades mayores que las alcanzadas por otros sensores.

ha dejado atónitos a los expertos, incluidos sus propios diseñadores, Charles Elachi y sus colegas del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena. El radar de imágenes se ensayó en el vuelo inaugural de la lanzadera espacial, en noviembre de 1981. El experimento SIR-A ("Shuttle Imaging Radar", Radar-A de formación de imágenes en lanzadera) proporcionó numerosas vistas del Sahara oriental. Tres años más tarde, el SIR-B obtenía también imágenes de la Península Arábiga, como hizo la más reciente encarnación del radar, el SIR-C ("Spaceborne Imaging Radar", Radar-C de imágenes espaciotransportado) en abril y en octubre de 1994. El experimento SIR-C emitía las imágenes digitalizadas a estaciones receptoras en tierra, para su análisis directo por ordenador. Al proporcionar tanto la polarización horizontal como la vertical, el SIR-C aportó más detalles de las regiones examinadas.

Las imágenes que el SIR-A extrajo del desierto occidental de Egipto, cerca de la frontera con Sudán, tenían que ver con mi propia investigación. Se trata de un terreno cubierto por una espesa capa de arena, cuya única peculiaridad topográfica son colinas bajas. Pero el radar desveló los lechos, vacíos desde hace mucho, de tres grandes ríos, cuya anchura iba de los ocho a los 20 kilómetros. Las colinas intermedias parecían haber sido islotes creados por erosión fluvial. Posteriores excavaciones sobre el terreno demostraron que las ondas de radar habían penetrado cinco metros en la arena, revelando, al hacerlo, las riberas de estos antiguos cursos de agua. Los arqueólogos desenterraron entonces hachas de mano, y demostraron que la región había sido habitada por humanos hacía cosa de 200.000 años.

El descubrimiento facilitó los datos que necesitaban los equipos de arqueólogos, biólogos y geólogos para verificar sus hipótesis sobre la evolución de esta parte del Sahara, justo al oeste del Nilo. El Desierto occidental sigue siendo hoy la región más seca de la Tierra. Aun así, los investigadores sospechan que entre 5 y 10 mil años atrás, el clima local era más húmedo; y con anterioridad había prevalecido un clima seco. Se creía que estas alternancias climáticas se remontaban unos 320.000 años. El radar de imagen zanjó la cuestión al

revelar vastos cursos fluviales de los períodos húmedos.

La capacidad para determinar la presencia de ríos invisibles permitió, a su vez, la elaboración de una imagen más completa de la primitiva civilización egipcia. Fred Wendorf que ha dirigido muchas investigaciones en el Desierto occidental, saca la conclusión de que, hace unos 11.000 años, las precipitaciones aumentaron desde cero hasta unos 100 a 200 milímetros anuales. Este giro permitió el crecimiento de gramíneas y espinos. Wendorf opina que, aunque el clima era inestable y repleto de sequías, los habitantes desarrollaron una economía compleja, basada en la ganadería extensiva.

La era lluviosa concluyó hace unos 5000 años, fecha que señala el comienzo de la civilización egipcia. Ambos sucesos guardan profunda relación. El cambio climático trajo gradualmente consigo una extrema aridez al Sahara oriental, induciendo, quizá, migraciones en masa hacia la única provisión segura de agua, el Nilo. Los orillas del Nilo, sin embargo, rebosaban ya con una población sedentaria. Puede haber sido la convergencia dinámica de estos dos pueblos la que plantó las semillas del antiguo Egipto.

Los moradores de las riberas vivían en armonía con el flujo y reflujo del Nilo. Medían la intensidad de las crecidas anuales y sabían, con gran ingenio, elevar el agua del río y encauzarla hacia sus campos. Sus pensamientos estaban dirigidos hacia la tierra, que cultivaban con gran pericia. Quienes llegaron desde el oeste tenían la "sabiduría del desierto". Habían aprendido a vivir con una pluviometría errática y a buscar pastos más verdes. Huyendo del calor abrasador del sol viajaban por la noche: eran buenos astrónomos.

La llegada a las riberas del Nilo de los pueblos del desierto incrementó la densidad regional, lo que obligó a una mejor organización social, para producir alimento suficiente. La interacción cultural entre ambos grupos creó una sociedad nueva y vigorosa: esta fertilización mutua fue la chispa que puso en ignición la civilización del antiguo Egipto.

FAROUK EL-BAZ es director del centro de detección remota de la Universidad de Boston. Su investigación se centra en el empleo de la percepción remota en arqueología y geología.

La aplicación menos explotada de la detección remota a la arqueología se desarrolla a ras del suelo. Recurre a sensores de mano. Cuando los arqueólogos estudian un emplazamiento, lo cuadriculan para guiar la excavación, que con frecuencia se efectúa en cada punto de intersección. Este método deja al capricho del azar muchos elementos. Los sensores de mano, en cambio, encaminan a los profesionales hacia la ubicación exacta de un artefacto, lo que reduce el área que es preciso remover y ahorra tiempo.

Anna C. Roosevelt, del Museo Field, se ha servido de tales instrumentos y experimentado con diversas combinaciones de los mismos. Una de las culturas estudiadas por Roosevelt ha sido la de un cacicato constructor de montículos, cuya subsistencia se fundaba en la pesca y en el cultivo de vegetales de la isla de Marajó, en la desembocadura del río Amazonas. Roosevelt se valió de una serie de instrumentos portátiles para discernir la naturaleza y ubicación de los montículos. La exploración minuciosa con magnetómetro de protones de varios montículos, de unas tres hectáreas cada uno, cuyas elevaciones iban de los 7 a 10 metros, permitió delinear los grandes fogones de arcilla cocida de muchas casas. Un radar de penetración subterránea reveló capas del subsuelo perturbadas. Mediante equipos electromagnéticos se detectaron los cambios de conductividad bajo la superficie, señalando las ubicaciones de los estratos. Además, instrumentos que medían la resistencia a la conducción eléctrica sirvieron para cartografiar los desplazamientos estratigráficos horizontales y verticales causados por plataformas de tierras hundidas, vertederos de basura y fogones. Dispositivos de medición de la refracción de ondas sísmicas permitieron detectar las ubicaciones de varios edificios y localizar el terreno original sobre el que se construyeron los montículos.

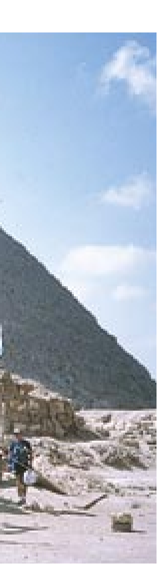
La comprensión aportada por estas técnicas, conjuntada con las excavaciones, permitió a Roosevelt formarse un cuadro del desarrollo de la vida en las riberas del Amazonas entre el siglo VI de nuestra era y la llegada de los europeos a la región, a mediados del XVI. Los pueblos marajoanos vivían en cacicatos independientes y mutuamente hostiles, recogían frutos y otros alimentos y construían sus amplios montículos para elevar sus asentamientos sobre las marismas.



4. INVESTIGACION TELEMETRICA realizada (*arriba*) en el segundo de los dos pozos sellados que contenían barcazas desmontadas del faraón Keops (Khufu). La primera nave, sacada a la luz en 1954, fue vuelta a ensamblar en un museo cercano al emplazamiento (*abajo*). Los daños que el medio ha producido en la barcaza aconsejaron dejar intacta la segunda y abordar su estudio telemétrico. Arriba, a la derecha, un especialista prepara un orificio estanco al aire, a través del cual podían bajarse instrumentos. Una esclusa de aire,

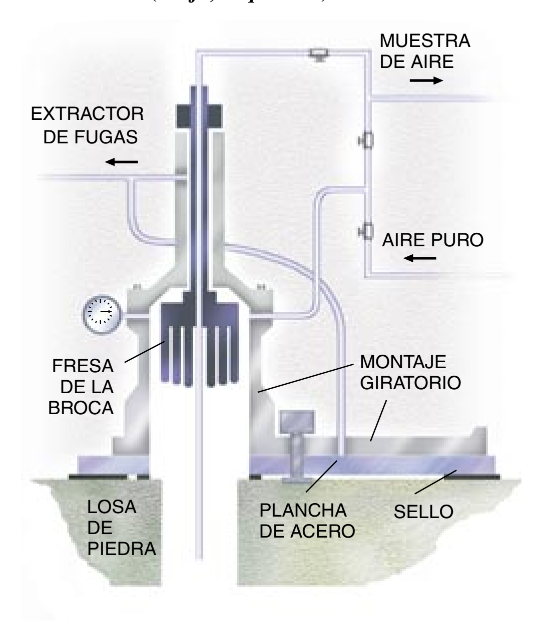








especialmente diseñada (*abajo*), impedía que entrara materia extraña en el pozo. Se selló a la piedra una plancha de acero; un montaje giratorio podía girar 90 grados para alinear los agujeros de la plancha y de la piedra en la perforación, o para cubrir el agujero de la placa fija, cerrando herméticamente la superficie de trabajo, lo que permitía el cambio sin riesgos de las brocas o los elementos de sondeo. Una fotografía tomada por control remoto acabó revelando los maderos apilados de la nave (*abajo, izquierda*).



Estuvieron durante siglos levantando sus casas sobre otras más antiguas. Roosevelt ha sostenido que la refinada cultura marajoana era indígena, desafiando así la teoría según la cual la prodigalidad de la vida selvática había impedido que entre los indios amazónicos llegasen a evolucionar sociedades complejas.

Su trabajo en el Brasil septentrional, cerca de Santarém, le ha llevado a otro descubrimiento que está convulsionando la ideas establecidas sobre la vida en el Amazonas. En antropología ha estado bien atrincherada la conclusión de que fueron los indios de México o Perú los que introdujeron la cerámica en el Amazonas. Pero el equipo de Roosevelt ha recogido pruebas de una población de pescadores que prosperaba en el lugar y se valía de cerámica hace unos 7000 años. El radar, penetrando en el subsuelo, reveló numerosos aspectos de las viviendas, y las exploraciones sismológicas y de resistividad detectaron las capas iniciales de ocupación, que por los métodos del carbono radiactivo y de la termoluminiscencia produjeron tan antiguas dataciones de las cerámicas. Dado que la cerámica amazónica posteriormente descubierta en otros yacimientos predata en millares de años a otras cerámicas del hemisferio occidental, esta investigación ha cambiado la imagen que se tenía del desarrollo cultural americano.

Una vez comenzada la excavación, los yacimientos se degradan muy pronto, expuestos como quedan a los elementos, a los visitantes y a los expoliadores. Mi primera experiencia en el uso de detectores remotos se produjo en 1987, trabajando en la Gran Pirámide de Gizéh. Construida por el faraón Khufu —más conocido por su nombre griego, Keops— hace unos 4600 años, la pirámide tenía dos cámaras selladas cerca de su base. La excavación de una de ellas comenzó en 1954; no tardó en descubrirse en su interior una barcaza desmontada, de 43,4 metros de eslora por 5,9 metros de manga. Fueron necesarios 18 años para excavar y ensamblar esta real barcaza, que quedó finalmente instalada en un “Museo Naval” construido al efecto en el lugar. Abierto a los visitantes en 1982, la nave se convirtió en atracción popular.

Y también se contrajo. Según ciertas estimaciones, la nave ha encogido alrededor de medio metro desde que se instaló en este museo. Los conservadores atribuyen el deterioro a las condiciones ambientales del interior del museo, que difieren de las reinantes en la cámara sellada. Se creía que una segunda cámara, también por abrir, contenía otra nave. Se me encargó el estudio del ambiente sellado, así como la determinación de la mejor forma de preservar la nave exhibida.

En 1987, la Organización de Antigüedades de Egipto, la National Geographic Society y el Centro de Detección Remota de la Universidad de Boston acordaron la aplicación de técnicas telemétricas en el estudio de la segunda cámara. Dado que la primera había estado herméticamente cerrada, parecía lógico que una muestra del aire tomada de la segunda pudiera facilitar datos sobre la composición de la atmósfera terrestre de hace 4600 años. Consulté con Bob Moores, que había trabajado en la perforadora utilizada por los astronautas del Apolo en la superficie lunar, sobre la forma de taladrar un orificio sin perturbar el ambiente prístino. Moores diseñó una esclusa de aire que permitía cortar la piedra sin mezclar el aire del interior con el del exterior. Nos servimos de radar de penetración subterránea para determinar la forma de la cámara y elegir el punto idóneo para la perforación.

Dos días y medio de trabajo ininterrumpido nos costó perforar el casquete pétreo, de 159 cm de espesor. Insertamos una sonda y tomamos muestras del aire de la cámara en tres niveles. A continuación, hicimos bajar por el orificio una cámara fotográfica y descubrimos jeroglíficos en las paredes de la cámara sellada, amén de la segunda nave real prevista. El análisis de las muestras de aire —así como una vista de marcas de humedad en las paredes y la presencia de un escarabajo del desierto que reptaba por ellas— demostraba que el ambiente moderno estaba, sin que supiéramos cómo, llegando hasta la cámara. Pero no fue necesario excavar ni poner en peligro la barcaza, por lo que sellamos el orificio y dejamos que la historia de la realeza siguiera en el mismo estado en que la encontramos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REMOTE SENSING AND THE ARCHAEOLOGY OF THE SILK ROAD. E. Pendleton Banks en *Current Anthropology*, vol. 36, n.º 3, página 520; junio de 1995.

HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGERY IN ARCHEOLOGICAL APPLICATIONS; WITH A PHOTOGRAPH OF THE STONEHENGE REGION. Martin J. F. Fowler en *Antiquity*, vol. 70, n.º 269, páginas 667-670; septiembre de 1996.

THE USE OF SATELLITE IMAGERY AND DIGITAL IMAGE PROCESSING IN LANDSCAPE ARCHAEOLOGY: A CASE STUDY FROM THE ISLAND OF MALLORCA, SPAIN. A. M. Montufo en *Geoarchaeology*, vol. 12, n.º 1 páginas 71-92; enero de 1997.

El expediente policial de Lev Landau

Los archivos del KGB revelan que este genio de la física, siempre bajo la mirada de la policía soviética, fue coautor de un panfleto antiestalinista que le llevó a la cárcel

Gennady Gorelik

Las teorías de Lev Davidovich Landau forman la espina dorsal de la física del estado sólido del siglo XX. Describen la superfluidez, principios de la superconductividad y fundamentos diversos de la astrofísica, la física de partículas y muchas otras disciplinas. Aún hoy en día son herramientas esenciales, entre otros descubrimientos suyos, los niveles de Landau, el diamagnetismo de Landau, el espectro de Landau, la teoría de Landau-Ginzburg. En sus textos se han formado generaciones de físicos: la biblioteca de la Universidad de Harvard guarda cuatro veces más obras suyas que del celebérrimo Richard Feynman.

Recibió el premio Nobel en 1962. Para sus admiradores era un teórico encerrado en una torre de marfil, atrevido, insolente, encantador pero alejado del tumulto de la existencia diaria. Ignoraban dos facetas políticas de su vida: los largos meses que pasó en las prisiones de Stalin a finales de los años treinta y su participación en la bomba nuclear del dictador, diez años después.

Sólo ahora hemos sabido que fue una persona con inquietudes políticas, siempre sospechosa para el KGB, la policía secreta soviética. Este descubrimiento se produjo hasta cierto punto por casualidad. Maia Besserab, sobrina de la esposa de Landau, publicó en 1989 la cuarta edición de la biografía de éste. Había llegado la *glasnost* (o "apertura") y la autora anunció que por fin podía contar toda la historia del arresto en 1938 de su biografiado. Un resentido ex alumno suyo, Leonid Pyatigorski, le había acusado, afirmaba Besserab, de ser un espía alemán, y eso durante el período estalinista del "Terror rojo", cuando millones de personas fueron ejecutadas bajo fantásticas acusaciones.

Pero Pyatigorski vivía todavía. Era cierto, en efecto, que Landau le había echado del grupo teórico del Instituto ucraniano de Kharkov. "Dau", como sus alumnos le llamaban, podía ser muy duro con ellos; un cartel en la puerta de su despacho les advertía: "¡Ojo, muerde!" Pese a lo cual, Pyatigorski siguió venerándole y, muy afectado por la acusación, llevó a Besserab a juicio en el verano de 1990.

En el KGB

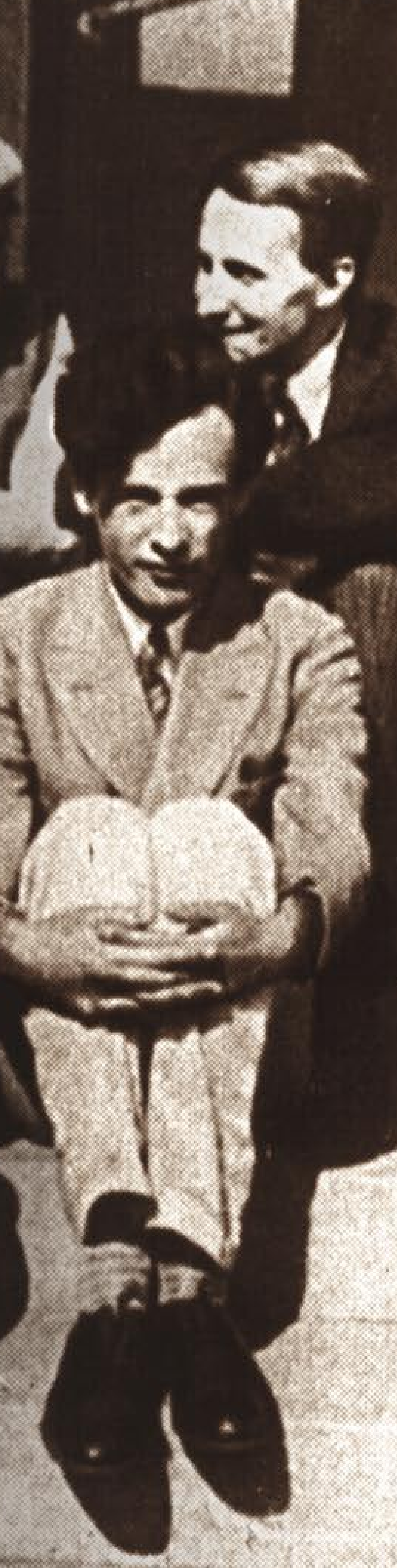
El juez pidió al KGB que revisara lo que en sus archivos hubiera sobre Landau. No se mencionaba en ellos a Pyatigorsky, y Besserab publicó una retractación. Por entonces fue cuando el KGB descubrió que el orgullo de la ciencia soviética no había sido una víctima inocente de la insania de Stalin, sino un verdadero militante antisoviético. El KGB publicó en 1991, casi entera, su documentación sobre Landau en una revista que poca vida tendría, un instrumento de la glasnost que llevaba el nombre de *Boletín del comité central del partido comunista*.

Tuve en mis manos el expediente de Landau unas semanas antes de que saliera a luz. Poco después de que la *perestroika* (o "reestructuración") se pusiese en marcha a finales de los años ochenta conseguí una plaza de investigador en el Instituto de Historia de la Ciencia y la Técnica de Moscú. Su director era hijo de Dimitri Ustinov, el ex ministro de defensa. Como ese apellido podía echar abajo murallas inexpugnables, decidí probar suerte e intentar fisgar en los archivos del KGB.

Con la mayor delicadeza redacté una carta en la que señalaba que casi nada se sabía del destino de muchos físicos soviéticos importantes arrestados en los años treinta. Incluí una lista de dos docenas de nombres, y preguntaba si cabría que los historiadores estudiasen los ficheros. Tras dos semanas de reflexión Ustinov firmó la carta; tuve la grandísima suerte de que (como luego se me explicó) acabara en la mesa de un vicejefe del KGB excepcionalmente liberal.

Dos meses después me comunicaron que podía examinar los ficheros, en su sede central, en el edificio de la Lubyanka, donde una legión infinita de presos habían pasado sus primeras horas de terror. Un guardia me inspeccionó en la entrada de manera exhaustiva, íntima y embarazosa. No había sala de lectura, sólo un cuartucho, para los parientes de los arrestados. Cuando expliqué que me iba a ser incómodo trabajar en una habitación con tanta gente llorando, mis anfitriones me dieron el despacho de un ausente por baja de enfermedad. Tenía las paredes cubiertas aún con los paneles de madera de los años treinta; bien podría haber sido el lugar donde interrogaron a Landau. Desde la ventana veía la cárcel del interior; allí lo encerraron.

También a mí me interrogaron. Dos funcionarios me preguntaron qué podía haber de interesante en las fichas de unos físicos ya muertos. A medida que les respondía me iba maravillando de que me hubieran siquiera dejado entrar en la sede del KGB. Sin duda los interrogadores sabían que mis padres, judíos, acababan de abandonar Rusia por los Estados Unidos; ¿querían pillarme? Me llevó un tiempo calmarme y comprender que el KGB



hacía todo lo posible por suavizar su imagen pública. Cuando al final me preguntaron si Andrei Sakharov fue de verdad un buen físico o sólo un disidente sobrestimado, pude comprobar que a mis dos policías les movía también la curiosidad.

Tras unas horas me dejaron con cinco ficheros en la mesa. Los documentos iban de 1930 a 1952; algunos eran un puro barullo, pero el de Landau, arrestado al final casi del *Terror rojo*, cuando empezaba a haber de nuevo un poco de cordura, estaba en muy buenas condiciones. Nada más abrirlo me pregunté si no sería una falsificación hecha en los años noventa. Llegué a la conclusión de que todos los documentos, hasta los que pudieran ser falsificaciones, eran de los años treinta. Pero no tenía forma de copiar nada como no fuese a mano.

Los físicos Yuri B. Rumer y Moissey Koretz fueron arrestados la misma noche que Landau. Rumer era uno de los pioneros de la química cuántica. Koretz, menos famoso, fue amigo íntimo y aliado de Landau, alguien a quien éste se dirigía en busca de consejo sobre los aspectos prácticos de la vida.

En el expediente de Rumer encontré tres informes; los relatores eran anónimos. Uno carecía de fecha y era pintoresco: decía que un conocido de Rumer era hijo de un rabino, vivía en Berlín y trabajaba para la Gestapo hitleriana. El segundo informe, de marzo de 1938, narraba una conversación entre Rumer y Landau acerca de unos cargos soviéticos: Landau opinaba que nada bueno podía esperarse de una gente que había nacido infrahumana. En el tercero, del 19 de abril, el informador revelaba que Landau y Rumer conocían una octavilla antisoviética, creada para ser repartida. Se suponía que el manuscrito original de este documento extraordinario estaba en el fichero de Koretz, y el expediente de Koretz, según se me dijo, se encontraba en la oficina del fiscal general. Pero en el de Landau había un ejemplar escrito a máquina. La intención era hacer copias del panfleto y repartirlo discretamente durante el desfile del primero de mayo. Dice así:

1. EN ESTA FOTO DE 1934 se ve a Lev Landau (*en primera fila, a la derecha*) y a sus compañeros en las escaleras del Instituto Físico-Técnico de Kharkov, Ucrania. Los esfuerzos de Landau por salvar la física pura en el instituto pronto le pondrían en apuros.

GENNADY GORELIK es investigador del centro de filosofía e historia de la ciencia de la Universidad de Boston. Recibió su doctorado en 1979 en el Instituto de Historia de la Ciencia y la Técnica de la Academia Rusa de Ciencias.

¡Camaradas!

La gran causa de la Revolución de Octubre ha sido diabólicamente traicionada. ...Millones de personas inocentes son arrojadas a las prisiones, y nadie sabe qué será de ellas. ...

¿No veis, camaradas, que la pandilla de Stalin ha dado un golpe fascista? El socialismo existe ya sólo en las páginas de los periódicos, mortalmente cubiertas de mentiras. Stalin, con su feroz aversión al verdadero socialismo, se ha convertido en el igual de Hitler y Mussolini. Para poner a salvo su poder destruye el país y hace que sea presa fácil del bestial fascismo alemán. ...

El proletariado de nuestro país, que ha derribado el poder del zar y los capitalistas, podrá derrocar a un dictador fascista y a su pandilla.

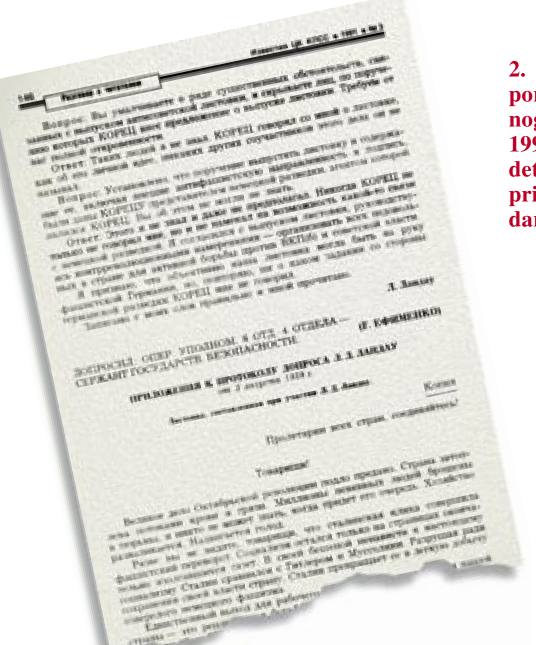
¡Viva el primero de mayo, el día de la lucha por el socialismo!

—El partido antifascista de los trabajadores.

Que yo sepa, este manifiesto es una de las sólo tres denuncias expresas de Stalin hechas por ciudadanos soviéticos durante el *Terror rojo*. Las otras dos fueron una carta abierta publicada en 1939 por un diplomático soviético que había escapado a París y que poco después murió en circunstancias misteriosas, y un pasaje del diario personal de Vladimir Vernadsky, el director del Instituto del Radio. Escribir, y sobre todo difundir, una denuncia así requería un valor increíble, rayano en la insensatez. Para entender por qué el KGB no eliminó inmediatamente a los ofensores hay que conocer antes el trasfondo.

Hijo de la Revolución

Landau nació de padres judíos el 22 de enero de 1908 en Baku, Azerbaiyán. Su padre era ingeniero de la industria petroquímica local; su madre, médico. Landau sólo tenía nueve años cuando estalló la revolución soviética de 1917. A los 14 entró en la Universidad de Baku; dos años después pasó a la de Leningrado. Se licenció en 1927 y continuó sus estudios en el Instituto Físico-



Л. Ландау

Пролетарии всех стран, соединяйтесь!

Товарищи!

2. EL ARRESTO Y EL INTERROGATORIO por el KGB en 1938 se precipitaron por un panfleto subversivo escrito por Landau y Moissey Koretz. Esta versión mecanografiada (*a la izquierda*) y la orden de arresto fueron publicadas por el KGB en 1991. Tras dos meses en prisión Landau escribió una confesión (*a la derecha*) donde detallaba su desilusión con el sistema soviético. El KGB aportó en 1991 la foto de prisión de Landau (*abajo del todo*) a la revista soviética *Piroda*; rehusó, en cambio, dar el perfil porque era demasiado deprimente.

Técnico de Leningrado, la cuna de la física soviética.

En 1929 se le concedió una autorización para visitar instituciones científicas extranjeras. Tras trabajar en Copenhague un año con Niels Bohr —célebre ya por sus contribuciones a la nueva física cuántica—, pensó alistarse en su equipo. En Inglaterra conoció a Pyotr Kapitsa, físico experimental de notable talento en el laboratorio Cavendish de Cambridge desde 1921. La teoría del diamagnetismo de los electrones en los metales, su primera gran aportación a la física, fue la respuesta a una de las preguntas de Kapitsa.

Landau marchó en 1932 a Kharkov para dirigir la división teórica del Instituto Físico-Técnico de Ucrania. Allí emprendió sus estudios seminales sobre las transiciones de fase de segunda especie, los cambios sutiles que sufre un sistema cuando, al contrario de lo que ocurre en la congelación del agua, no se produce una emisión o absorción de calor. Estudió, además, el ferromagnetismo, el proceso de formación de los imanes.

Maestro capaz y entusiasta, inició con su alumno Evgenni Lifshitz el *Curso de física teórica* en nueve volúmenes, todo un clásico. Su instituto adquirió muy pronto reputación mundial por la excepcional preparación de sus cuadros, capaces de abordar cualquier tema de física teórica.

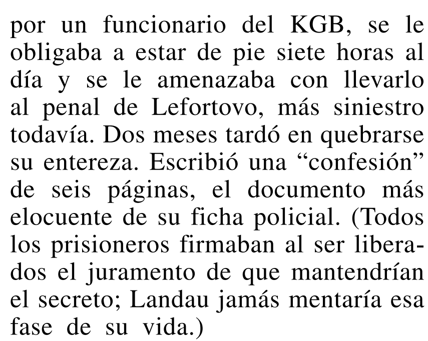
Hendrik Casimir, que conoció a Landau en Copenhague, le recuerda como un comunista ferviente, muy orgulloso de sus raíces revolucionarias. El entusiasmo con que se entregó a la construcción de la ciencia soviética era una consecuencia de ese fervor socialista. Publicó en 1935 un extraño artículo titulado “Burguesía y física contemporánea” en el periódico *Izvestia*. Además de atacar la inclinación burguesa a la religión y al poder del dinero, cantaba las “oportunidades sin precedentes que el partido comunista y el gobierno han deparado al desarrollo de la física en nuestro país”. Clasificador compulsivo, Landau llamaba a sus amigos y a sí mismo “comunistas”, a los que odiaba, “fascistas”, y a los miembros veteranos de la profesión simplemente *wisent*, es decir, bisontes, a punto de extinguirse.

Pese a su fe en el sistema soviético, algunos autores socialistas le atacaron. A finales de los años veinte el descubrimiento de una nueva desintegración nuclear en la que desaparecía un poco de energía causó un gran revuelo. Landau y otros apoyaron en un principio la idea de Bohr de que se violaba la conservación de la energía. Pero luego, como descubrió que esta hipótesis contradecía la teoría de la gravedad de Albert Einstein, la abandonó. (La explicación de Wolfgang Pauli, que una partícula neutra desconocida, a la que más tarde Enrico Fermi llamaría neutrino, se llevaba la energía que faltaba, sería la que quedaría.) Por desgracia el cofundador del marxismo, Friedrich Engels, había escrito en el siglo XIX que la ley de la conservación de la energía sería siempre fundamental para la ciencia; a Landau se le castigó duramente en la prensa por su blasfemia (temporal).

Fuera como fuere, sus opiniones sociales pronto sufrirían por sí solas un cambio de fase. En 1934 se nombró un nuevo director para el Instituto de Kharkov. Traía órdenes de reorientar la investigación hacia objetivos militares y aplicados. Landau luchó ardorosamente por salvar la ciencia pura. Sugirió que se dividiese el instituto, con una de las ramas consagrada a la física básica. En el tablón de anuncios del instituto, donde se debatía en voz alta sobre el futuro del centro, Koretz colgó una defensa vigorosa de los planes de Landau. Y Pyatigorsky, que no sabía que la oposición a las directrices oficiales se interpretaría como



3. CERCANOS A LANDAU, Koretz (*izquierda*) y Yuri B. Rumer (*abajo*) fueron arrestados la misma noche que él. Koretz pasó 20 años en el Gulag; Rumer, 10 años en una institución científica penal o *sharashka*. Pyotr Kapitsa (*derecha*) salvó a Landau al sostener que sólo él podría explicar un gran nuevo descubrimiento. Era la superfluidez.



un sabotaje contra la industria militar soviética, confirmó a los administradores esos planes (por esta ofensa le despidió Landau). Koretz fue arrestado en noviembre de 1935.

Landau intentó defender valientemente a su amigo, y apeló al jefe del KGB en Ucrania. Koretz fue liberado "por falta de pruebas", lo que, dados los tiempos que corrían, es muy sorprendente. (Unos meses después el funcionario del KGB en Kharkov se suicidó. Quizá fuese uno de los muchos idealistas que no pudieron soportar la evidencia de que la brecha entre los ideales comunistas y la realidad era cada vez mayor.) En una nota incluida en el expediente de Koretz se advertía que el KGB no debería perder de vista a quien "no se le ha probado la culpa", pero "era miembro de una organización contrarrevolucionaria dirigida por Landau".

En prisión

El KGB arrestó en 1937 a varios físicos alemanes que trabajaban en Kharkov. No sólo a ellos. En la redada cayeron dos amigos de Landau, Lev Shubnikov y Lev Rozenkevich, quienes "confesaron", antes de que los asesinaran, que Landau dirigía una organización contrarrevolucionaria. Landau vio que debía buscar un lugar más seguro. Kapitsa le ofreció en Moscú la jefatura de la división teórica del Instituto de Problemas de Física, y allí se presentó en febrero. Koretz le siguió muy pronto; Rumer se le había adelantado. Un año después, el 28 de abril de 1938, Landau, Koretz y Rumer eran arrestados.

Los alumnos y colegas de Landau fueron reprobados por seguirle en sus prédicas "contra el materialismo dialéctico e incluso contra la ley de conservación de la energía". Creían que a Landau le había denunciado algún enemigo por su pasada insolencia. Qué duda cabe que Landau tenía enemigos; le gustaba ir pisando callos. Cierto día de los inocentes (el 1 de abril), puso un cartel que clasificaba a los miembros del claustro de Kharkov según el talento de cada uno y modificaba los salarios en consecuencia; a sus superiores no les sentó bien la broma.

Las acusaciones contra Landau eran en realidad mucho más graves que una herejía científica. Se le acusaba de encabezar una organización contrarrevolucionaria; las confesiones sacadas a sus "cómplices" "probaban" esa acusación para satisfacción del KGB. El panfleto sólo determinó la fecha del arresto: una semana antes del tradicional desfile del primero de mayo.

Se vio que Rumer no tuvo nada que ver con el panfleto. Así lo testificaron Landau y Koretz, y se le levantó ese cargo. Pero las acusaciones de espionaje a favor de Alemania, sin ningún fundamento, hicieron que pasara 10 años en un *sharashka*, un instituto de ciencia e ingeniería con reglamento carcelario.

Landau fue trasladado a la prisión de Lubyanka. Según una nota que se guarda en su expediente, apresuradamente escrita a mano al parecer por un funcionario del KGB, se le obligaba a estar de pie siete horas al día y se le amenazaba con llevarlo al penal de Lefortovo, más siniestro todavía. Dos meses tardó en quebrarse su entereza. Escribió una "confesión" de seis páginas, el documento más elocuente de su ficha policial. (Todos los prisioneros firmaban al ser liberados el juramento de que mantendrían el secreto; Landau jamás mentaría esa fase de su vida.)

La confesión dice: "A principios de 1937 llegamos a la conclusión de que el partido había degenerado y de que el gobierno ya no actuaba en interés de los trabajadores sino en provecho de un núcleo dirigente, de que el interés del país requería el derrocamiento del gobierno existente y la creación en la URSS de un estado que mantuviese los *kolkhozes* [granjas industriales] y la propiedad estatal de la industria, pero basado en los principios de los estados democrático-burgueses."

No pueden tomarse muy en serio las "confesiones", dadas las circunstancias en que se producían, pero ésta es tan inusual que creo que es cierta. Los dos físicos debieron de llegar a una conclusión que a la mayoría de sus conciudadanos se les escapó a lo largo del medio siglo siguiente. Fue Koretz quien convenció a Landau de la necesidad de emprender acciones prácticas; el panfleto está escrito de su puño y letra. Pero la inteligencia política que estaba detrás del texto era de Landau. Su "grafofobia" era bien conocida; la mayor parte de sus obras fueron escritas por sus colegas, incluidos los famosos *Cursos*. (La confesión fue el manuscrito más largo que Landau escribiera en su vida.) Los dos conspiradores habían firmado

el manifiesto con el nombre de una organización imaginaria para que la gente se lo tomara más en serio.

Koretz se pasó 20 años en el Gulag. Volvió a Moscú en 1958, donde nos vimos algunas veces antes de que muriera de cáncer en 1984. Le entusiasmaba la ciencia y trabajaba en una revista de divulgación científica. A pesar de sus penalidades era un hombre maravillosamente vital, vigoroso. Me contó muchas anécdotas de Landau, pero nunca las circunstancias del arresto de ambos. Koretz no fue nunca rehabilitado, es decir, no se reconoció oficialmente que la acusación contra él había sido injusta. Era un indicio de que, al contrario que a la mayoría de las víctimas del Terror, se le detuvo por alguna razón real.

La ciencia de Landau

Lev Landau fue uno de los primeros, en 1927, en utilizar la matriz de densidad, herramienta matemática que describe las mezclas de estados cuánticos. Luego expuso las propiedades de los gases de electrones y halló que en un campo magnético los electrones quedan encerrados en órbitas de energía cuantizada, los que hoy se llaman niveles de Landau. En astrofísica propuso la existencia de núcleos estelares hechos de neutrones, las que acabarían denominándose estrellas de neutrones. Y a la vez que un grupo estadounidense, explicó la producción de cascadas de electrones por los rayos cósmicos.

Las mayores contribuciones de Landau se refieren a las transiciones de fase de segunda especie, en las cuales una sustancia pasa de un estado ordenado a otro desordenado sin absorber calor. Una transición así es la del helio en estado normal al superfluido. Landau describió la superfluidez por medio de rotones, excitación cuya existencia terminaría por descubrirse pero cuya naturaleza genuina sigue envuelta en el misterio. Introdujo también el parámetro de orden, una especie de función de ondas a gran escala. Aplicado al helio superfluido, el parámetro de orden describió el comportamiento de los átomos en su estado cuántico ordinario; aplicado a los superconductores, descubrió diversas propiedades, como la manera en que la corriente fluye alrededor de un campo magnético que penetre; aplicado al helio 3 superfluido, describió un enjambre de configuraciones complejas.

Con su alumno Vitaly Ginzburg elaboró en 1950 un armazón teórico a través del cual el fenómeno universal de la ruptura de la simetría —gracias al cual, por ejemplo, los quarks adquieren su masa— se enunciaba con sencillez, de nuevo con un parámetro de orden.

A Landau debemos saber que los ferroimanes —los imanes de la experiencia ordinaria— se dividen en dominios en los cuales los componentes microscópicos apuntan en direcciones diferentes. Trabajó en la física del plasma y en 1956 desarrolló la teoría de los líquidos de Fermi, que contienen partículas del estilo de los electrones que interaccionan intensamente. También le interesó la teoría de partículas: elaboró una representación estadística del núcleo, puso en entredicho la coherencia de la electrodinámica cuántica y, con otros, estableció el principio de conservación de la paridad de carga. Y ésta es sólo una lista parcial de sus logros.



LOS DIEZ MANDAMIENTOS de Landau. Sus alumnos dibujaron en 1958 estas tablas de los mayores descubrimientos que se le deben para celebrar su quincuagésimo cumpleaños. Landau creó una "escuela" de física —un estilo de describir el mundo natural— que transmitió a través de su docencia y escritos.

Kapitsa salvó a Landau. Gracias a su creación de una nueva técnica de producción de oxígeno —vital para la metalurgia y, en consecuencia, para la industria— Kapitsa tenía muy buenas relaciones con el gobierno. Se movía con extraordinaria soltura en las esferas oficiales y escribió a lo largo de su vida más de cien cartas al Kremlin acerca de cuestiones relativas a la política científica o para salvar a algún colega en gravísimo apuro, como Vladimir Fock, el teórico de la mecánica cuántica de campos.

En 1938 el jefe del KGB "desapareció". Le sucedió Lavrenti Beria. Tras dos años de carnicería Stalin había conseguido su propósito: destruir a todos sus rivales, reales o imaginarios. Viendo que se le abría una oportunidad, Kapitsa escribió al primer ministro Vyacheslav Molotov que acababa de hacer un descubrimiento "en el más desconcertante campo de la física moderna" y que el único teórico que podría explicarlo sería Landau. La víspera del primero de mayo de 1939, tras un año de encarcelamiento, se le puso en libertad condicional. En unos meses explicó la superfluidez de Kapitsa recurriendo a las ondas sonoras, o fonones, y a una nueva excitación, el rotón. Ambos ganaron por ello el premio Nobel unos decenios después.

Landau se casó en 1939 con K. T. Drobanzeva, y en 1946 tuvieron un hijo, Igor. Fue un matrimonio insólito. Parece que Landau defendía el amor libre y apremiaba a sus estudiantes y a su desconcertada esposa a que lo practicasen.

Pocos años después de que se pusiera en libertad a Landau, Stalin creó el programa atómico soviético. La bomba de Hiroshima aceleró el proceso. El instituto de Kapitsa quedó adscrito a la empresa, y Stalin nombró a Beria supervisor supremo del proyecto. Kapitsa no era pacifista, pero le pareció intolerable tener que trabajar bajo las órdenes del jefe de la policía de Stalin en una atmósfera de máximo secreto. Se quejó en carta al dictador de ese nombramiento.

La hora de la bomba de hidrógeno

Fue un paso demasiado arriesgado. El general Andrei Khrulev, amigo de Kapitsa, le contó una conversación que les había oído a Beria y Stalin. Beria quería la cabeza de Kapitsa, pero Stalin le dijo que, si bien podía echarle de todos sus puestos, no podía matarle. Parece que Stalin respetaba

el prestigio mundial de Kapitsa como físico: era miembro de la Regia Sociedad británica.

Kapitsa se libró del patíbulo, pero quedó bajo arresto domiciliario hasta la muerte de Stalin. Landau, en cambio, participó en el proyecto secreto. Su trabajo en la creación de la bomba fue de matemática, no de física teórica. Con los físicos que dirigía calculó la dinámica de la primera bomba termonuclear soviética, la *sloyka*, o "tarta a capas", cargada con deuteriuro de litio. (Según Hans Bethe, uno de los creadores de la bomba estadounidense, los americanos habían tomado en cuenta este compuesto, entre otros, para el diseño de "despertador" original, análogo a la *sloyka*. Pero, al contrario que los cálculos de Landau, los de los americanos no pudieron predecir el resultado.)

Parte de las matemáticas desarrolladas con ese fin se desclasificaron y publicaron en 1958, durante el primer deshielo nuclear. El trabajo correspondiente a la integración numérica choca en las *Obras completas* de Landau. En este volumen aparece también el artículo suyo que más consecuencias haya tenido. Lo escribió con Vitaly Ginzburg en 1950, durante las investigaciones de la bomba; en él se expone un armazón teórico, simple y poderoso, que permite la descripción de una variedad enorme de sistemas (los superconductores, las partículas elementales, las mezclas químicas, etc.), y anticipa el fenómeno genérico de la ruptura de la simetría, central en física de partículas. Por sus contribuciones a las bombas atómica y de hidrógeno recibió dos premios Stalin, en 1949 y 1953. En 1954 se le nombró "héroe del trabajo socialista".

Landau debió de pedir permiso en 1957 al partido comunista para salir al extranjero. A instancias del partido, el KGB transcribió ciertas conversaciones de Landau con sus amigos entre 1947 y 1954. La información se había obtenido mediante "técnicas especiales" —así las definía el KGB— y aportaciones de informantes. El documento apareció en los archivos del partido comunista; dice mucho.

En las transcripciones Landau afirma de sí mismo que es un "esclavo científico". Dado su natural rebelde, no sorprende; además, sus experiencias de los años treinta le habían puesto en contra de Stalin. Pero los documentos descubren una transformación política más honda. Un amigo señaló en una ocasión que si Lenin levantase la cabeza se quedaría horrorizado de lo que vería. "Lenin empleó las mismas formas de represión", replicó Landau.

Más tarde dijo: "Nuestro régimen, lo vengo sabiendo desde 1937, es definitivamente fascista, y por sí mismo no puede cambiar de una forma sencilla. ... Creo que mientras exista este régimen es ridículo esperar que se desarrolle hasta convertirse en algo decente. ... El problema de la liquidación pacífica de nuestro régimen es un problema que afecta al futuro de la humanidad. ... Sin fascismo no hay guerra." Por último, concluía, "está muy claro que Lenin fue el primer fascista".

No es necesario mucho esfuerzo para darse cuenta del carácter extraordinario de tales opiniones. Casi todos los colegas de Landau eran profundamente prosoviéticos, como Igor Evgenyevich Tamm, el primer soviético que ganó el premio Nobel de física, y Andrei Sakharov, el primero que ganó el de la paz. Quienes reconocían los pecados de Stalin lo consideraban un criminal que había traicionado la causa de Lenin; Lenin seguía siendo un héroe.



4. NOTA SECRETA en la que Landau le pide a Igor Evgenyevich Tamm datos sobre las velocidades de partículas necesarios para los cálculos de la primera bomba de hidrógeno soviética.

Que yo sepa, sólo dos físicos expresaron su malestar por tener que trabajar en la bomba de Stalin. Uno fue Landau, el otro Mikhail Leontovich, quien en 1951 fue nombrado jefe de investigaciones teóricas del programa soviético de fusión nuclear. Landau participó en el programa de la bomba porque así se protegía de las autoridades. Intentó limitar su trabajo y en una ocasión insultó al físico Yakov Zeldovich ("esa perra") porque intentó ampliarlo. Tras la muerte de Stalin le comentó a su amigo y discípulo Isaac M. Khalatnikov: "Se acabó. Se murió. Ya no me da miedo y no trabajaré nunca más [en las armas nucleares]." Y abandonó el proyecto de la bomba.

Queda en el aire una pregunta obvia. Si Landau trabajó en la bomba a regañadientes, ¿por qué fue tan importante su contribución? Khalatnikov, que sería director del Instituto de Física Teórica Landau, creado en 1965, me dio la respuesta: lisa y llanamente, él era incapaz de hacer una chapuza.

En 1962 sufrió un accidente de coche. Sobrevivió, pero padeció graves lesiones cerebrales, que alteraron su personalidad y menoscabaron su capacidad científica. Parecía ser muy consciente de que ya no era el mismo. Murió el 1 de abril de 1968.

Tras dos semanas estudiando los archivos del KGB me sentí incapaz de seguir. La multitud de vidas rotas registradas en ellos me abrumó emocionalmente. Tras la caída en 1991 de la Unión Soviética se reestructuró el KGB y, hasta donde yo sé, ningún historiador ha accedido regularmente a los archivos desde entonces. No cabe duda de que ocultan aún muchas historias asombrosas, y quizás alguna más acerca de este físico extraordinario.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LANDAU, THE PHYSICIST AND THE MAN: RECOLLECTIONS OF L. D. LANDAU. Dirigido por I. M: Khalatnikov. Pergamon Press, 1989.

KAPITZA IN CAMBRIDGE AND MOSCOW: LIFE AND LETTERS OF A RUSSIAN PHYSICIST. Dirigido por J. W. Boag, P. E. Rubinin y D. Shoenberg. North-Holland, 1990.

MATVEI PETROVICH BRONSTEIN AND SOVIET THEORETICAL PHYSICS IN THE THIRTIES. Gennady E. Gorelik y Viktor Ya. Frenkel. Birkhauser, Basilea y Boston, 1994.

STALIN AND THE BOMB: THE SOVIET UNION AND ATOMIC ENERGY, 1939-1956. David Holloway. Yale University Press, 1994.

'MEINE ANTISOWJETISCHE TAETIGKEIT...': RUSSISCHE PHYSIKER UNTER STALIN. Gennady Gorelik. Vieweg, Braunschweig, 1995.

La dehesa

Se ha pasado de presentarla como una explotación agropecuaria latifundista, de resonancias peyorativas, a exaltar sus virtudes. En esta reconciliación pesa mucho el equilibrio obtenido entre explotación y conservación del ecosistema

Angel Puerto

Cuando se habla de pastos se evocan ecosistemas cuyo constituyente básico son las especies herbáceas. A la escala restringida de un monte o una comarca, los pastos podrían clasificarse de acuerdo con las plantas dominantes. A escala mundial, carecería de sentido apoyarse en la flora para dar una definición precisa de la estepa rusa, la sabana africana, la pradera norteamericana o la pampa argentina. En este caso, las condiciones climáticas, la composición del suelo y el grado de intervención humana resultan los criterios adecuados.

Entre los diferentes tipos de pastos que pueden establecerse de esta manera, se encuentran los pastizales seminaturales, que constituyen un importante recurso económico para la península Ibérica. Con el nombre de dehesas, en España, y de montados, en Portugal, los pastizales ocupan amplias áreas de suelos pobres en el centro, oeste y suroeste del contexto peninsular.

Los pastos seminaturales de dehesa suponen un proceso mediante el cual se mantienen zonas deforestadas en regiones de clima forestal. La eliminación de árboles y matorral por tala e incendios controlados, unida al ramoneo con cabras, permitió en el pasado abrir claros en el bosque y, con ello, el desarrollo de los pastos característicos de dehesa, que pasaron a ser consumidos por ganado vacuno, ovino, porcino y caballar. Con frecuencia se ha practicado también la roturación itinerante del terreno, para conseguir cultivos forrajeros y para controlar la invasión del matorral.

Talas, siegas, pastoreos, incendios y roturaciones evitan la tendencia natural del ecosistema hacia la recuperación del bosque primitivo mediante la sucesión ecológica. Cuando la presión ejercida por el ganado es lo suficientemente alta, dicha recuperación queda frenada por el propio





1. ASPECTO TIPICO DE UNA DEHESA. Las encinas ocupan las partes altas. La vega por la que discurre el arroyo, casi carente de arbolado, conserva algunos fresnos. La disponibilidad de agua viene marcada por el cambio de tonalidad del pasto. La presencia del ganado condiciona la dinámica del ecosistema. El esparcir el alimento por toda la ladera durante la carencia estival constituye una práctica de transporte a "contracorriente" (opuesto a la gravedad) de retorno de los nutrientes al suelo por medio de las deyecciones, el cual contrarresta algo el consumo preferente de las partes bajas en las estaciones favorables.

pastoreo. Pero en los últimos años, la ganadería basada en el consumo de pastos ha experimentado una notable regresión, debido fundamentalmente a la estabulación del ganado y a su alimentación con piensos. Este hecho plantea problemas de gestión y conservación de los recursos renovables. De aquí que el conocimiento de los mecanismos que intervienen en la organización de estos sistemas, así como de su respuesta a las distintas perturbaciones, sean las bases de una política de utilización racional de nuestros recursos.

Las especies leñosas desempeñan funciones fundamentales en la dehesa. Ocupan un lugar principal la encina y el alcornoque, seguidos del roble melojo y el quejigo. El arbolado suele conservarse en zonas altas, para disminuir paulatinamente, e incluso desaparecer, en las bajas. Por su parte, el matorral tiende a persistir en enclaves elevados, lomas y crestas, pedregales y pendientes. La dehesa cuenta así con un sistema protector que mitiga las pérdidas materiales ladera abajo.

Esta contraposición entre partes elevadas y bajas ha permitido sintetizar la estructura y función de la dehesa en un sistema, la ladera. Se presenta ésta como una estructura geomorfológica vectorial, lo que significa que las variaciones que se producen en ella se desarrollan de manera continua. El fenómeno de la vectorialidad en suelos, vegetación y producción ha quedado demostrado en múltiples estudios. Las posiciones topográficamente elevadas actúan como zonas de exportación de agua, minerales y materia orgánica.

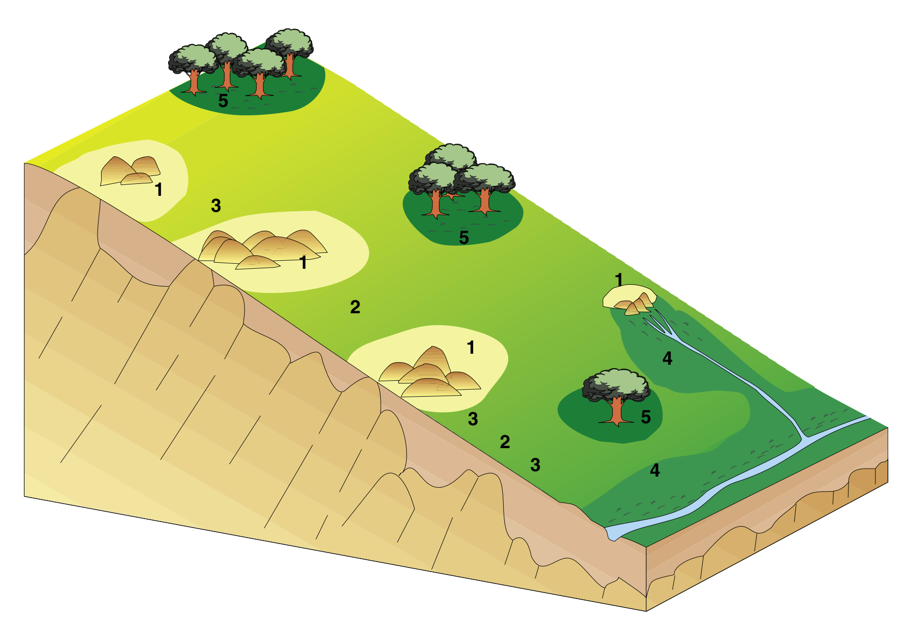
El transporte ladera abajo de los materiales termina en las zonas bajas, más fértiles, con mayor humedad edáfica y riqueza en nutrientes. No hay que olvidar que el principal factor limitante de la producción en las dehesas es el agua y, en este sentido, las zonas bajas actúan como receptoras de la escorrentía, al tiempo que el agua freática resulta de más fácil acceso para los sistemas radicales de las plantas.

Si se interpreta el concepto de madurez como el grado de desarrollo que puede alcanzar un sistema, las zonas bajas, de suelos eutróficos, poseen un grado de madurez mayor que las altas, las cuales sufren un proceso continuo de rejuvenecimiento a causa de las pérdidas que experimentan. Se trata de un caso típico de explotación; el sistema explotador, el que recibe materiales, gana en madurez, mientras que el sistema explotado, el que cede estos materiales, se ve relegado a permanecer en fases juveniles al quedar en gran parte anuladas sus posibilidades de evolución.

ANGEL PUERTO enseña en el área de ecología de la facultad de biología de la Universidad de Salamanca.

La explotación ganadera de la dehesa modifica hasta cierto punto esa situación ideal. En las zonas bajas, la fertilidad del suelo y el pastoreo favorecen una mayor productividad, es decir, una relación más alta entre la producción y la biomasa mantenida (cociente P/B), lo que constituye una característica juvenil de los ecosistemas, ya que la tendencia hacia la madurez se caracteriza por un aumento de la biomasa estante, por ejemplo en forma de estructuras leñosas, y en consecuencia por la disminución del cociente citado.





2. CELULARIDAD EN LA LADERA. La continuidad o vectorialidad de las laderas se pierde por aspectos circunstanciales que hacen que aumente o disminuya la fertilidad. Los números indican enclaves de similar tipología.

La explotación ganadera no persigue obtener altos valores de biomasa, sino de producción. En una explotación extensiva los herbívoros domésticos concentran el consumo hacia los lugares más productivos, por lo que las zonas bajas sufren una intensa presión. Curiosamente, el hecho de que las especies de estas localizaciones tengan una tasa de renovación tan alta como para aguantar un consumo fuerte, viene potenciado por el mismo ganado que, con su pastoreo reiterado, selecciona las plantas capaces de renovarse con rapidez, con potencial para seguir creciendo aunque pierdan gran parte de su biomasa. Se establece un circuito recurrente positivo, en el sentido de que, a más consumo, mayor tasa de renovación de las especies, y a mayor tasa de renovación de las especies más intenso es el consumo.

Las circunstancias varían mucho para las especies de las zonas altas. Por su escasa producción y palatabilidad son menos atractivas para los grandes herbívoros, pero es que, aunque lo fueran, carecerían de medios para responder a un consumo acusado, dado que la oligotrofia del suelo les impide alcanzar la tasa de renovación necesaria. Las zonas altas producen poco y lo que producen lo pierden o, a lo más, llegan a invertir lo no perdido en estructuras leñosas (matorral). En ausencia de explotación, la producción de las zonas bajas podría invertirse en estructuras leñosas, recuperándose el bosque.

Pero el comportamiento del ganado y de la fauna silvestre induce un cambio de sentido en la vectorialidad de las laderas. Los animales buscan para su descanso lugares bien venteados, al tiempo que los enclaves en los que abunda el matorral son preferidos para la nidificación de numerosas aves y como parideros de los herbívoros. Esto supone un transporte de "contracorriente", por el cual parte de los nutrientes pasa de las localizaciones bajas a las altas.

A esa trayectoria inversa de los nutrientes hemos de sumar una mayor proporción de la hojarasca de árboles y matorrales que se deposita en lugares elevados, con lo que se logra que apreciables cantidades de nutrientes fertilicen la totalidad de la ladera en su retorno a las hondonadas. En definitiva, estas restituciones tienden a cerrar el ciclo de los nutrientes, si bien algunas prácticas de manejo, como el esparcimiento de estiércol, la colocación de rediles en lugares elevados o la disposición de comederos en zonas altas, pueden resultar más efectivas.

La vectorialidad de la dehesa se rompe a veces para originar mosaicos de escala muy dispar, fenómeno que se conoce con el nombre de celularidad. Los mosaicos de escala mediana o grande rompen la secuencia vectorial de comunidades. En esta categoría entran las surgencias de agua que suelen producirse a media ladera, los afloramientos rocosos, el arbolado y los cultivos. Las surgencias son propias de zonas medias o medias-bajas; los afloramientos, de las zonas altas.

La celularidad implica "saltos atrás" o "saltos adelante" en el gradiente básico de comunidades sobre el que se establece. Así, la presencia de afloramientos alternantes en la ladera, junto a las orlas de suelo esquelético que los circundan, van constituyendo saltos atrás. Si se recorre la ladera de arriba abajo, el suelo va ganando en potencia y fertilidad. La presencia de un afloramiento supone volver a las condiciones oligotróficas originales y recomenzar el proceso hacia una mayor eutrofia. Por el contrario, si en el recorrido de la ladera se encuentra una surgencia, la disponibilidad de agua propicia la presencia de una vegetación similar a la de la zona de depósito. La ladera ha experimentado un repentino avance en su grado de trofismo, lo que implica un salto adelante.

Todo este conjunto de circunstancias estructurales no deben hacer olvidar la perspectiva de que se está tratando de ecosistemas explotados, donde el pastoreo constituye un factor que fuerza a que la comunidad herbácea se autoorganice dentro de unos límites estrictos. Los animales no sólo impiden la evolución del sistema hacia el bosque, sino que intervienen, los herbívoros sobre todo, en el ciclo de los nutrientes. Los efectos directos de los herbívoros de gran tamaño son el consumo de la biomasa vegetal, el pisoteo del suelo y de las plantas, el retorno de los nutrientes a través de las heces y de la orina y, como es lógico, la incorporación de otra parte de los nutrientes en forma de productos animales.

La intensidad de tales efectos está determinada por el estado inicial de la vegetación y del suelo, los factores climáticos, especialmente temperatura, precipitación y evapotranspiración, las distintas especies de herbívoros y la densidad de sus poblaciones, la duración y frecuencia del pastoreo y la distribución espacial de plantas y animales. Por ejemplo, una carga suficientemente intensa de ganado conduce a un encespedamiento del pasto. Estos pastos, muy productivos, no sólo tienen su origen en la presión de consumo, sino también en el enriquecimiento edáfico en nutrientes, al estar permanentemente abonados por las deyecciones. En concreto, el suelo es rico en materia orgánica, nitrógeno, fósforo y, sobre todo, potasio, elemento muy móvil que cambia de compartimento del sistema con mucha

rapidez. De esta forma se obtienen los majadales.

Las acciones mutuas entre herbívoros, plantas y microorganismos edáficos deben contemplarse dentro de un proceso de coevolución a través del cual el sistema de pasto ha adquirido el mejor equilibrio posible, al lograr que no existan descompensaciones entre producción, consumo, inmovilización temporal de nutrientes en el humus y descomposición de la materia orgánica.

El pastoreo induce el incremento de especies adaptadas al mismo. El pastoreo excesivo supone un grado de defoliación tan alto, que aumenta la sensibilidad de las plantas frente al estrés hídrico, incrementa el pisoteo, impide la recuperación de las especies herbáceas y termina por denudar y erosionar el suelo. El pastoreo escaso favorece la aparición de especies poco apetecibles para los herbívoros domésticos, según la tendencia sucesional hacia el bosque. El pisoteo, además, compacta el suelo y puede crear ambientes edáficos donde predomine la anaerobiosis, limitando el reciclado de los nutrientes y el buen funcionamiento de las raíces.

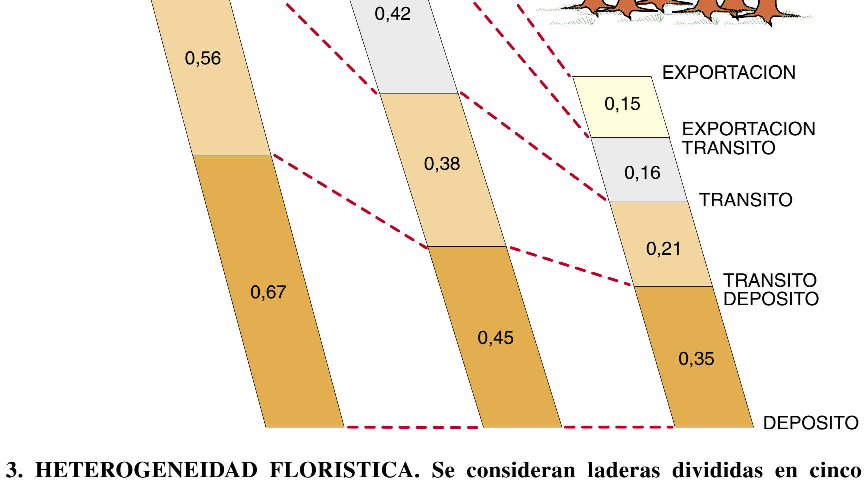
El reciclado a través de los herbívoros mantiene un conjunto de nutrientes cerca de la superficie del suelo, que queda a disposición de las plantas. Se añade que el consumo puede estimular la absorción radical y conseguir un reciclado más rápido de varios elementos. Así, los tallos de las especies herbáceas y arbustivas contienen mucho más nitrógeno en los lugares sometidos a pastoreo que en las zonas contiguas sin herbívoros.

Pero la disposición de nutrientes en la superficie del suelo no sólo está condicionada por los herbívoros. El arbolado de las dehesas desempeña aquí una función primordial. Podríamos dividir en dos grupos muy amplios los productores primarios de la dehesa: los estables, que siguen la estrategia de la K, y los transitorios, que siguen la estrategia de la r. Los elementos estables, indicadores de alta madurez y de baja productividad, se renuevan lentamente; pertenecen a este grupo los árboles. Los elementos poco persistentes, propios de estados de escasa madurez ecológica, de alta productividad, se renuevan con rapidez; son las especies herbáceas. Aunque ambos tipos de elementos coexisten en el sistema, las estructuras más conservativas, los árboles, ejercen su acción sobre las más productivas, las plantas herbáceas.

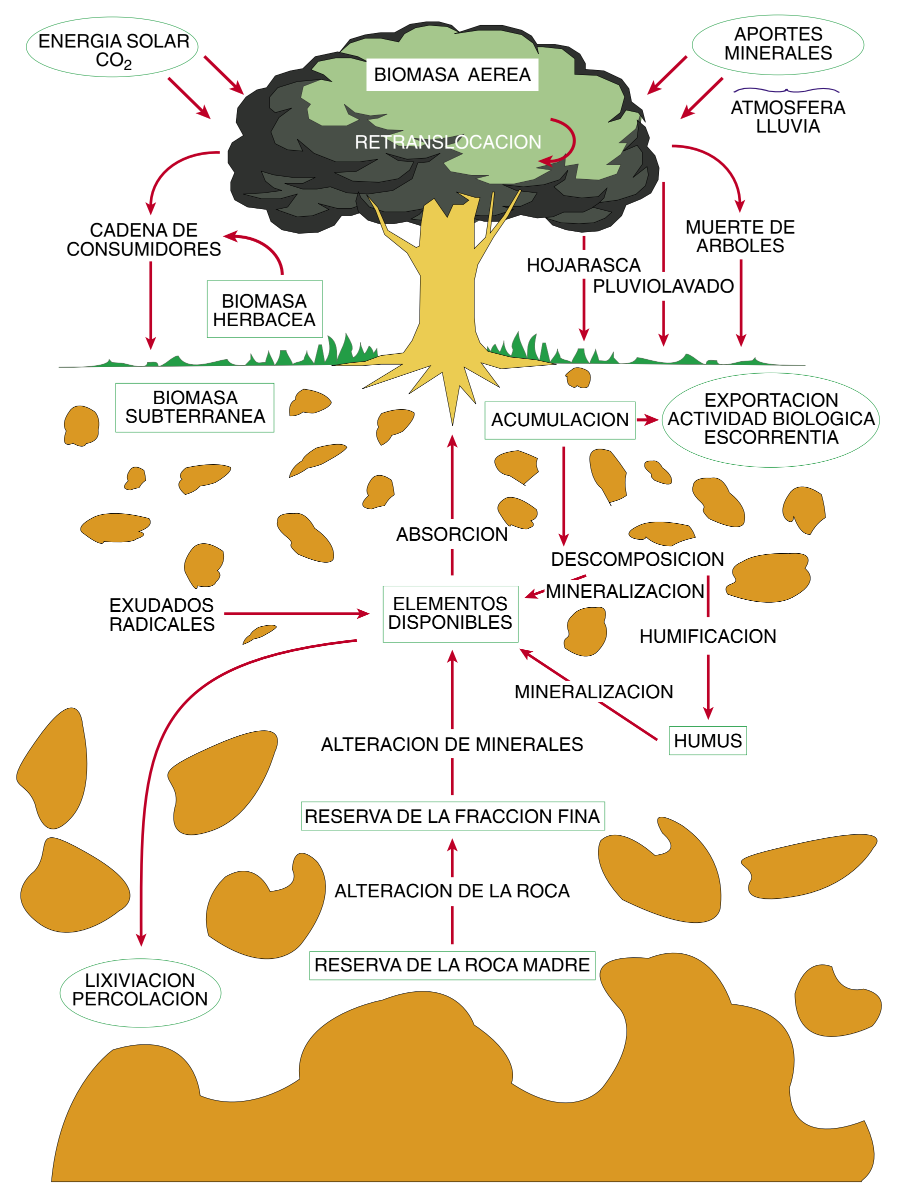
Los árboles bombean fertilidad de las capas bajas del suelo y, a través de la hojarasca, la ponen a disposición de las herbáceas, cuyas raíces se concentran en los 20 cm superficiales. Los árboles ejercen una clara influencia espacial, que se manifiesta en la distribución a lo largo de las laderas, rompiendo la monotonía de las variaciones vectoriales, por lo que son causa de celularidad. Dada su presencia preferente en las partes elevadas, constituyen otro ejemplo de saltos adelante, ya que evitan la erosión del suelo, mejoran la calidad edáfica, crean su propio microclima, mantienen una fauna peculiar, protegen al ganado, tienden a homogeneizar las laderas y, en suma, desempeñan una importante función al mantener la estabilidad del sistema.

De los efectos citados, tal vez los que más han llamado la atención son los ligados al suelo y el hecho de que bajo las copas crezca un pasto diferente en su composición botánica y en su configuración estructural. Los aportes minerales del subsuelo a las capas superiores suponen un enriquecimiento de materia orgánica. Además, la capacidad para extraer agua proporciona un ambiente más húmedo que el del entorno, a lo que se une la protección que ejerce la sombra y el hecho de que queda frenado el viento, y con él su efecto desecante. Se forma un humus rico en bases.

Bajo las copas, y en su proximidad inmediata, crece un pastizal diferente del que se encuentra en los claros. Se aprecia que la vegetación que crece en la proyección del borde de la copa con orientación norte tiende a parecerse a la vegetación bajo la copa, mientras que la que crece en



3. HETEROGENEIDAD FLORISTICA. Se consideran laderas divididas en cinco sectores, los tres clásicos (exportación, tránsito y depósito) y otros dos intermedios. La heterogeneidad entre sectores, indicada por los números y longitud de las columnas, es pequeña bajo la copa de los árboles, aumenta para los espacios abiertos y resulta máxima para una combinación de ambos. Por tanto, el arbolado es un poderoso agente homogeneizador de las laderas considerado en sí mismo, pero en unión con los claros, como sucede en la dehesa, da lugar a heterogeneidades altas.



4. EL ARBOLADO Y LOS CICLOS BIOGEOQUIMICOS. Los ciclos biogeoquímicos de la materia orgánica y de los bioelementos se potencian en la dehesa por la presencia de los árboles. El suelo bajo los mismos es mucho más rico, húmedo y está mejor estructurado que en los espacios abiertos. En el esquema se recogen las principales vías de intercambio.

el borde de orientación sur muestra un parecido mayor con los espacios abiertos. Bajo la copa también se aprecian diferencias entre las exposiciones norte y sur, pero son menos patentes que en el borde, dado que el fuerte efecto del sombreado mitiga las posibles variaciones.

La estructura condicionada por el arbolado abarca otros muchos aspectos. Las gramíneas alcanzan el máximo predominio bajo la copa y las leguminosas en los espacios abiertos. Esto es una consecuencia de la abundancia en nitrógeno y del sombreado, ya que en los claros el nitrógeno puede ser fijado directamente de la atmósfera por los nódulos simbióticos de las leguminosas, al tiempo que en la competencia por la luz triunfan las especies de mayor desarrollo, las gramíneas. La proyección del borde de la copa sobre el suelo supone el lugar de contacto entre ambientes distintos, participando de las características de ambos, por lo que suele presentar la diversidad mayor.

En los cultivos itinerantes de las dehesas, el arbolado obliga a dejar áreas sin labrar en la proximidad de los troncos. Se mantienen así pequeños núcleos donde la estructura edáfica no se ve modificada, la materia orgánica no es mineralizada con rapidez, se conserva la edafofauna y persisten especies herbáceas propias del pastizal. Los árboles posibilitan que el sistema mantenga rasgos de cierta complejidad.

Las especies herbáceas que se secan antes son las de los espacios abiertos del sector de exportación, y las que experimentan un retraso mayor las que se encuentran bajo las copas de los árboles del sector de depósito. La conservación de una densidad algo mayor de arbolado en el sector de depósito debería ser potenciada, más aún si se trata de fresnedas, ya que contribuyen mediante el ramón a la economía de la dehesa. Si la fitomasa aérea se completa mediante la subterránea, el cociente entre partes subterráneas y aéreas es mayor en los sectores altos. Se confirma así la teoría de que, en los lugares secos, el desarrollo radical es comparativamente más importante como respuesta a la falta de agua del medio.

Respecto a la composición química de la hierba, se producen variaciones vinculadas a los distintos ciclos fenológicos, convertidos en el factor predominante. Si se evita la arritmia en los ciclos, se comprueba que para el arbolado tiene menos importancia la división de la ladera en sectores que en el caso de los claros. Los valores más elevados de nitrógeno, fósforo, potasio y calcio se encuentran en el pasto que crece bajo las copas. Para el sodio ocurre lo contrario, y también para el magnesio, aunque en menor proporción.

A primera vista, la dehesa ofrece un aspecto homogéneo, casi monótono. La realidad es muy diferente. La alternancia aleatoria de espacios maduros e inmaduros en la dehesa ha facilitado la conservación del sistema. Esa estabilidad, que ha permitido su persistencia, alcanza su punto clave en la facilidad de recuperación tras una perturbación severa por sequías o cultivo.

Cuando se rotura una ladera, el proceso queda limitado a los sectores altos y medios, respetando los pastos más productivos. Pero si el sector de depósito no es muy húmedo, la perturbación abarcará la ladera entera, lo que permite apreciar mejor las distintas fases por las que atraviesa la recuperación posterior. Los cultivos en las dehesas son de pequeña extensión, itinerantes, con tiempos cortos de explotación y ciclos largos. En principio, el efecto de la roturación y del

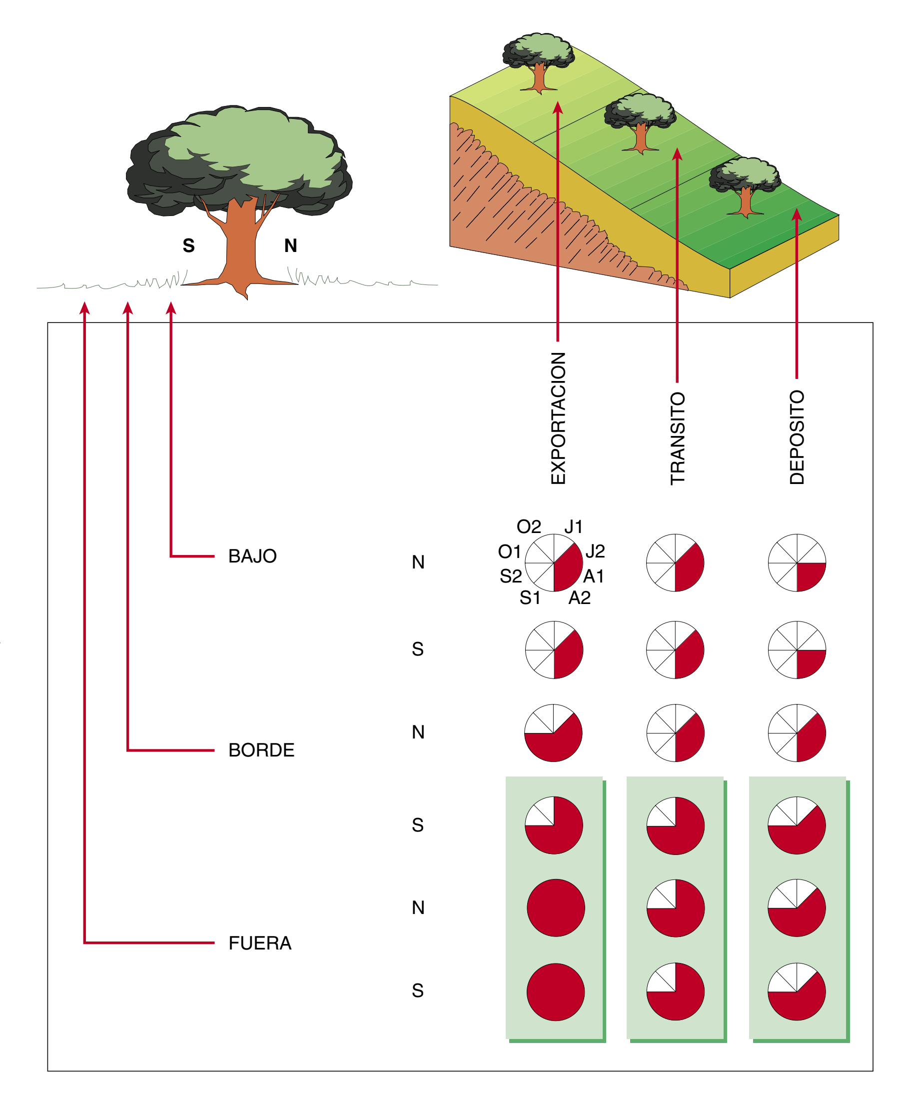
cultivo supone una homogeneización casi total de la ladera.

Cuando cesa el cultivo y se abandona el terreno, comienza la sucesión ecológica, o conjunto de cambios que experimenta un ecosistema con el paso del tiempo. Al principio, los relevos son muy rápidos, pueden establecerse bastante bien y predominan las especies anuales, predominio que se prolonga cualitativamente durante todo el proceso, aunque cuantitativamente en las partes medias y bajas tiendan a asentarse especies perennes. En las lomas las especies anuales terminan por dominar cualitativa y cuantitativamente.

El ritmo de los relevos decrece con el tiempo, hasta alcanzarse un estado estacionario. Cuando el ecosistema permanece por debajo de los factores ambientales debido a las actividades humanas, se habla de disclímax. En este sentido, los pastos seminaturales de dehesa constituyen una disclímax, a medio camino entre el cultivo y el bosque. Por supuesto, los cambios que se producen no afectan sólo a la composición específica, sino que quedan implicados multitud de factores físico-químicos y procesos de organización que alcanzan una alta complejidad.

Desde el punto de vista termodinámico, la estabilidad del ecosistema se asocia a su resistencia en el tiempo, o capacidad de permanecer, y a su facilidad para volver a su estado anterior después de sufrir una perturbación. La estabilidad es una característica de las etapas maduras. El pasto maduro resiste perturbaciones no drásticas y demuestra una elevada capacidad de recuperación en cuanto la perturbación ha cesado. La itinerancia de los cultivos crea parcelas de distintas edades, que coinciden en un momento dado.

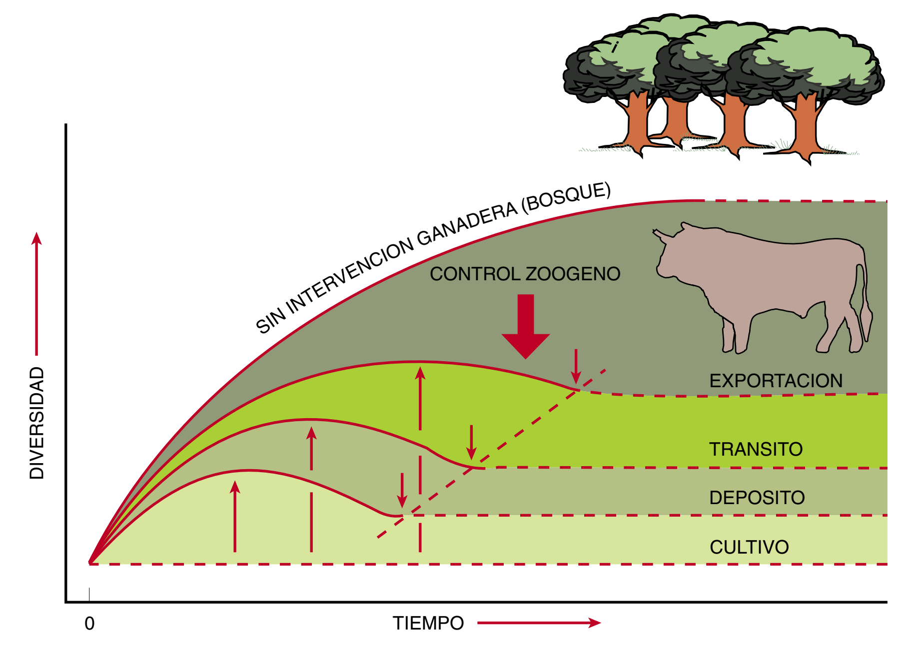
Las primeras plantas que aparecen son oportunistas o pioneras que colonizan terrenos vacíos, de dispersión rápida y pródigas en la producción de semillas. Germinan con rapidez en condiciones de alteración del sustrato. A estas especies herbáceas les sustituyen paulatinamente otras poblaciones, configurando distintas comunidades que, bajo la presión del ganado, acaban por dar lugar al pastizal. El proceso de sustitución se manifiesta por “indiferencia” y por “facilitación”. La “indiferencia” es la mera sustitución de una especie por otra. Se llama “facilitación” al proceso por el que las especies precedentes modifican el medio en favor de las nuevas que advienen.



5. ARBOLADO Y HUMEDAD EDAFICA. (En quincenas, desde la primera de julio (J1) a la segunda de octubre (O2), en que la humedad del suelo queda por debajo del punto de marchitez permanente.) En el sector de exportación y fuera de los árboles las condiciones son peores, al tiempo que la orientación S del borde tiende a parecerse a los espacios abiertos y la N a las condiciones que se presentan bajo los árboles. La gráfica es válida para las dehesas en general, pero en cuanto a los meses de referencia sólo para las salmantinas.

La homogeneización de la ladera causada por el cultivo se prolonga durante algún tiempo debido a las especies pioneras, cuya falta de exigencias en cuanto a los condicionantes edáficos las hace ser generalistas, ocupando desde el sector de explotación hasta el de depósito. El suelo se torna más compacto. Al ir disminuyendo el agua de infiltración los flujos tienden a volverse superficiales. Se forma un gradiente desde las zonas altas, que sufren denudación, hasta las bajas, donde se acumulan agua y nutrientes. Las especies han ido variando cualitativa y cuantitativamente, las generalistas van cediendo paso a las especialistas, indicadoras de mayor madurez. Los sectores de la ladera se hacen patentes, pero no son estáticos, ya que se producen desplazamientos hacia arriba o hacia abajo de las comunidades. No obstante, aunque se hable de comunidades, estos movimientos se limitan a las poblaciones de especies que contraen o dilatan su espacio de supervivencia. En el caso de las especies generalistas, los cambios climáticos no presentan repercusiones sobre su localización.

En la dehesa, las sucesiones alcanzan cierta estabilidad entre los 15 y los 25 años, tiempo que depende del clima, de los nutrientes del suelo, de la posición topográfica, con sucesiones más rápidas en el sector de depósito, seguidas de las del sector de transporte y, por último, de las del de exportación, y del manejo que se haga del ganado, acelerándose el proceso con la intensidad de la carga ganadera. En las fases intermedias desaparecen los condicionantes impuestos por el



6. DIVERSIDAD Y SUCESION. La diversidad aumenta durante la sucesión hasta alcanzar el estado de bosque. Sin embargo, el control zoógeno en la dehesa hace que disminuya después de unos pocos años de incremento. La estabilidad se alcanza antes cuanto más fértil sea el sector de la ladera que se considere y la diversidad llega a ser mayor y permanece más alta cuanto más pobre sea el sector en cuestión.

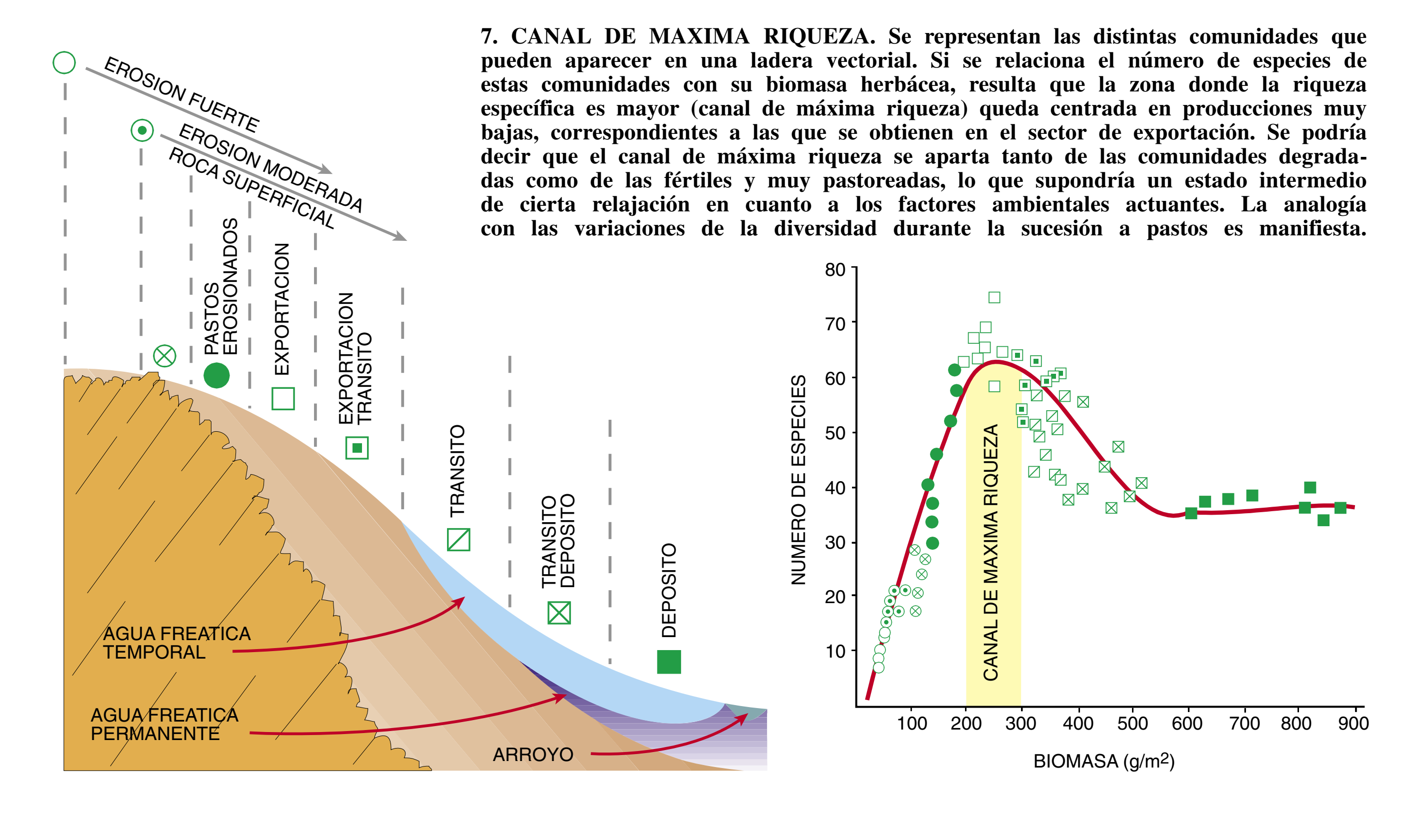
cultivo y no han aparecido todavía los debidos a la presión ganadera. Las fases intermedias se ven libres de la severidad ambiental inicial (cultivo) y final (efecto acumulativo del ganado).

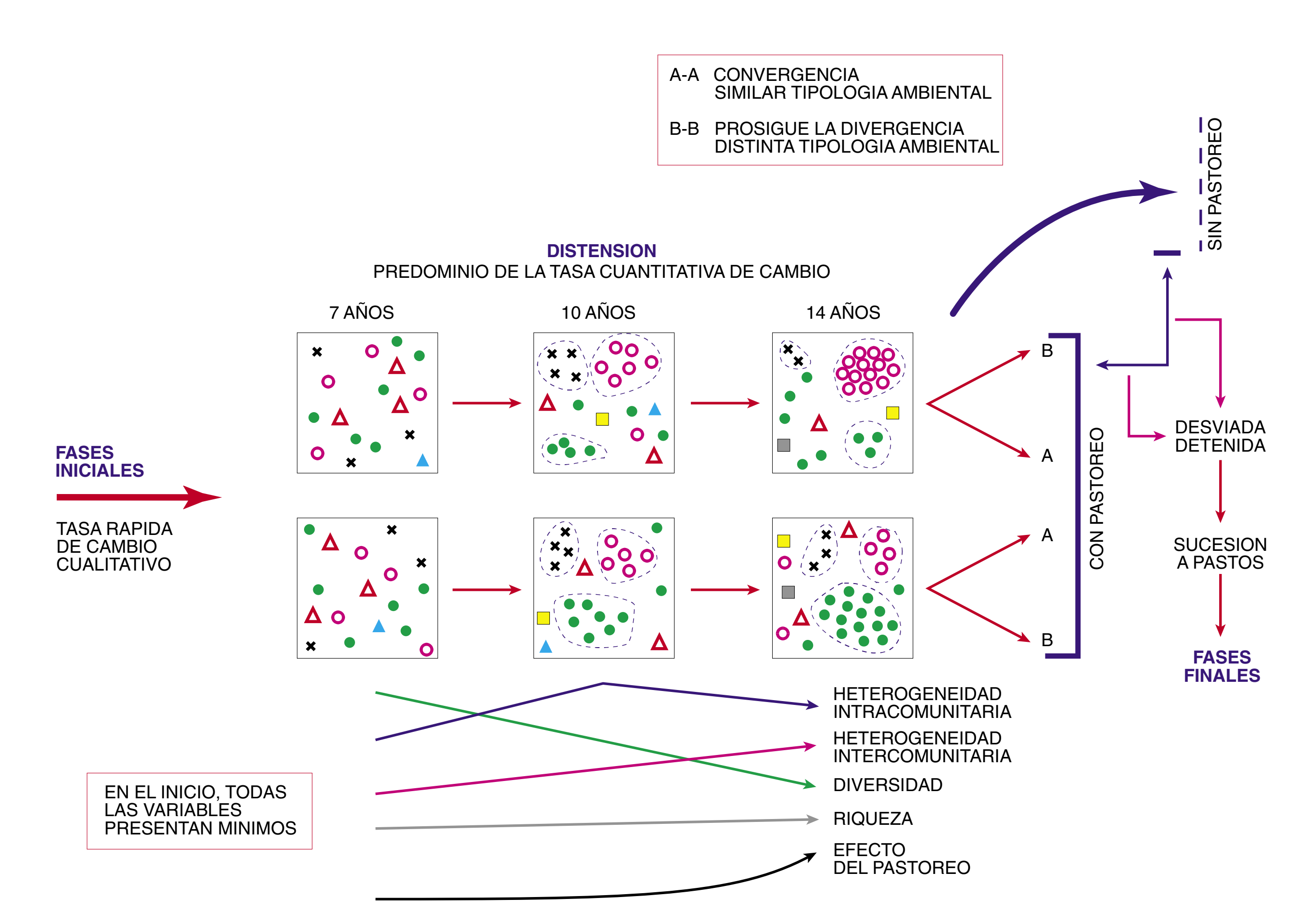
Los problemas son mayores en áreas marginales. Las laderas, casi sin recubrimiento herbáceo, con un sustrato arenoso y pedregoso, se cubren de matorral de escobas, genistas y jaras. Las veguillas, con aportes considerables de materiales y agua, constituyen casi la única unidad de producción pascícola; el matorral parece ser la fase terminal, con evolución muy lenta hacia el bosque.

En las laderas, la evolución aleatoria, de fuerte entropía, que sigue al cultivo, se relaciona con unas comunidades jóvenes, inmaduras, poco organizadas e improductivas. El sistema estructurado en sectores, de baja entropía, que marca el final de la sucesión, es característico de comunidades avanzadas, maduras, con un alto grado de organización y una producción elevada. A esta norma temporal se superpone, sin embargo, la espacial marcada por los propios sectores. Así, el sector de exportación es el menos maduro y organizado; las numerosas especies que lo habitan no suelen dominar. En el sector de tránsito desciende el número de especies y se incrementa la dominancia. Por último, el sector de depósito cuenta con pocas especies y la dominancia suele ser acusada, pero las especies, al menos las dominantes, no suelen repetirse. Si atendemos a la diversidad, observamos que ésta va disminuyendo al pasar del sector de exportación al de depósito, mientras que la heterogeneidad aumenta, por lo que se habla de una estructura de “grano fino” para las zonas elevadas y de una estructura de “grano grueso” para las más bajas.

La producción herbácea tiende a aumentar durante la sucesión, sobre todo en la zona baja. La razón de estas diferencias se relaciona con la fertilidad, con el efecto ejercido por

7. CANAL DE MAXIMA RIQUEZA. Se representan las distintas comunidades que pueden aparecer en una ladera vectorial. Si se relaciona el número de especies de estas comunidades con su biomasa herbácea, resulta que la zona donde la riqueza específica es mayor (canal de máxima riqueza) queda centrada en producciones muy bajas, correspondientes a las que se obtienen en el sector de exportación. Se podría decir que el canal de máxima riqueza se aparta tanto de las comunidades degradadas como de las fértiles y muy pastoreadas, lo que supondría un estado intermedio de cierta relajación en cuanto a los factores ambientales actuantes. La analogía con las variaciones de la diversidad durante la sucesión a pastos es manifiesta.





8. FASES INTERMEDIAS DE LA SUCESION. Son las de estudio más comprometido, porque están poco influenciadas tanto por el cultivo como por el efecto del pastoreo. En general, puede decirse que durante ellas se produce una distensión, si bien se empiezan a estructurar las especies (*representadas mediante símbolos*) que van a constituir el pasto. Al principio crece la heterogeneidad intracomunitaria, pero se acaban por formar corros, dominados por alguna especie, que hacen que aumente la heterogeneidad intercomunitaria y disminuya la diversidad. Si las condiciones ambientales son equivalentes, las comunidades de pasto finales tienden a converger. De lo contrario prosigue la divergencia. Sin pastoreo la tendencia sería hacia el bosque, pero con él la sucesión queda detenida y también desviada de la tendencia natural.

el ganado y su concentración en los sectores de depósito. De hecho, se seleccionan las especies de mayor tasa de multiplicación, capaces de formar céspedes y resistir fuertes pérdidas de su biomasa, pero también algunos ecotipos rastreros y plantas que cuenten con cualquier tipo de defensa. Al tiempo, se incrementa la palatabilidad de las especies. En general, este incremento se debe a que aumentan el contenido celular y la proteína, mientras que disminuyen celulosa y lignina. Sin pastoreo ocurriría lo contrario.

El retorno de fitomasa con los excrementos y restos sin consumir, muy variable, se halla vinculado a la presión de explotación. Por otra parte, la composición mineral de la hierba de las dehesas es muy deficiente para la nutrición animal, y tanto más cuanto más se aproxima a la senescencia. De unos suelos tan pobres no podía esperarse una gran riqueza en macronutrientes. Curiosamente, las mayores deficiencias en algunos nutrientes corresponden a las partes bajas y, sobre todo, a las medias.

En resumen, la ecología de la dehesa no puede entenderse sin hacer referencia a los rasgos del territorio sobre el que se desarrolla, pero mucho menos sin contemplarla como un sistema de explotación secular, donde los conocimientos empíricos basados en la alternancia de errores y aciertos han conseguido mantener un ecosistema estable, regulado y productivo.

La rentabilidad de la dehesa se basa en minimizar las entradas de energía, buscando los caminos del autoabastecimiento. Otros países ya vienen mostrando un gran interés en las prácticas de la ganadería extensiva en pastos seminaturales arbolados, dado que constituyen una muestra evidente de que puede alcanzarse un equilibrio entre explotación y conservación de buena parte de los valores naturales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ESTUDIO INTEGRADO Y MULTIDISCIPLINARIO DE LA DEHESA SALMANTINA. Dirigido por Enrique Balcells. UNESCO. M.a.B., 4 volúmenes, 1977-1982.

VARIATION IN STRUCTURE AND DIVERSITY IN MEDITERRANEAN GRASSLANDS RELATED TO TROPHIC STATUS AND GRAZING INTENSITY. Angel Puerto, Mercedes Rico, María Dolores Matías y José Antonio García en *Journal of Vegetation Science*, volumen 1, número 4, páginas 445-452; septiembre de 1990.

EL LIBRO DE LAS DEHESAS SALMANTINAS. Coordinado por José M. Gómez. Junta de Castilla y León, 1992.

TREE CANOPY EFFECTS ON COMMUNITY STRUCTURE IN SLOPES OF MEDITERRANEAN RANGELANDS. Angel Puerto y Mercedes Rico en *Ecology* (Bratislava), volumen 13, n.º 2, págs. 161-171; abril de 1994.

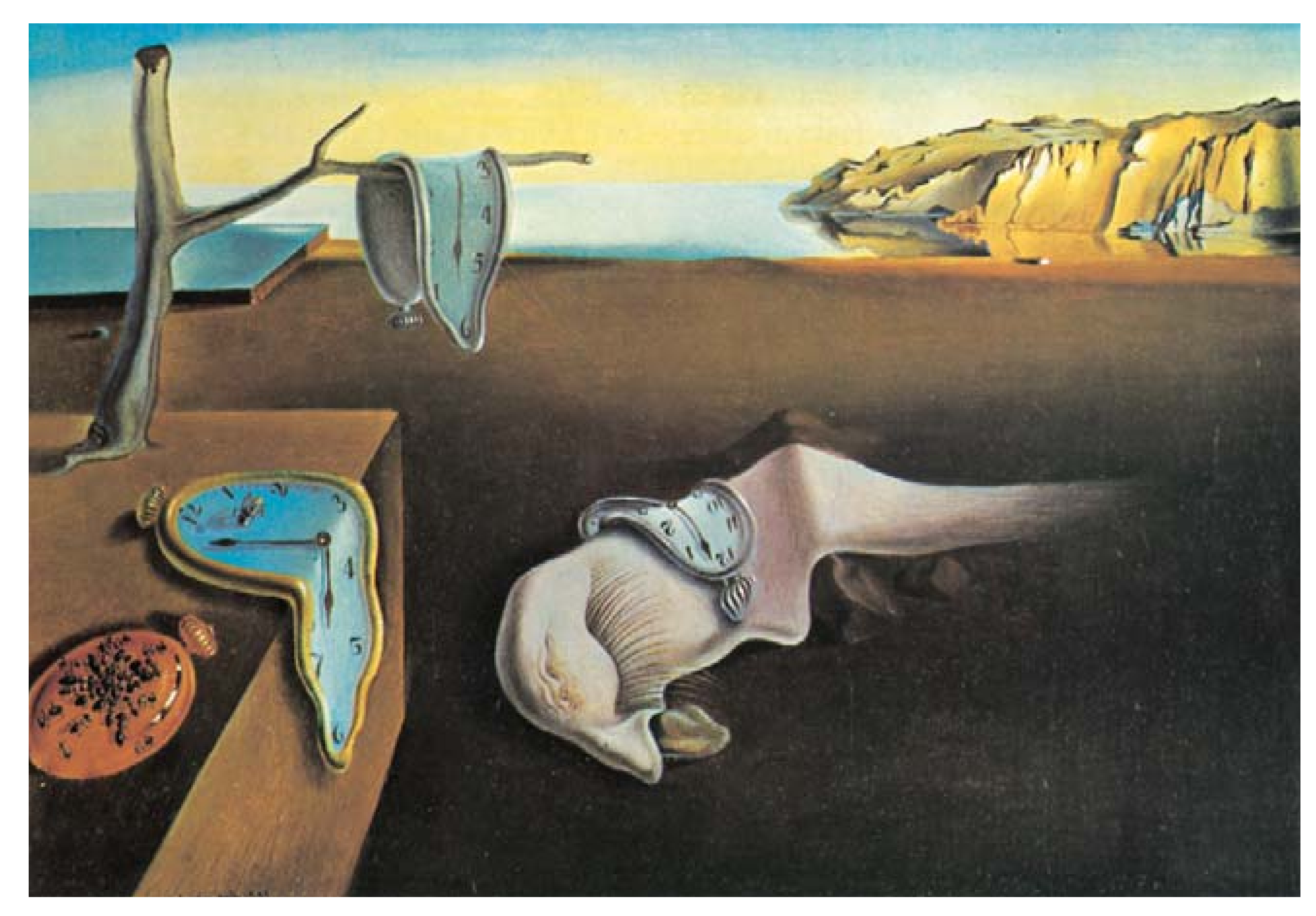
El tiempo en psicología

Dos siglos de estudios experimentales han demostrado la imposibilidad de establecer una correspondencia biunívoca entre el tiempo físico y el psicológico. El segundo tiene, además, una vertiente cultural y social

Giovanni Bruno Vicario

Son muchas las experiencias que denotamos con el término "tiempo". Comprenden las que se refieren a la instantaneidad y la duración, la simultaneidad y la sucesión, al presente, al pasado y al futuro, a la irreversibilidad del tránsito de pasado a futuro. Otras experiencias están relacionadas de forma más o menos directa con las temporales: movimiento, velocidad, ritmo y otras. El problema radica en la aparente imposibilidad de articular semejante variedad de fenómenos en un sistema coherente.

En la historia del pensamiento se reconocen dos tendencias en la búsqueda de soluciones del problema del tiempo. La primera tiene sus raíces en Pitágoras (s. VI a.C.) y en Aristóteles (s. IV a.C.), fue desarrollada por Newton y Kant y es la que encontramos reflejada en la física de ayer y de hoy. Según esta opinión, el tiempo es un hecho natural, al que se adapta la mente. La otra tendencia, que se remonta a Plotino (s. III d.C.) y San Agustín (s. IV d.C.), fue desarrollada principalmente por Franz Brentano y Edmund Husserl, filósofos que brillaron entre el último tercio del siglo pasado y el primero del nuestro. Según esta opinión, el tiempo es un fenómeno que pertenece a la mente; además, el tiempo al que se refieren los físicos sería una idealización de los contenidos mentales. En otras palabras: en la primera



1. *LA PERSISTENCIA DE LA MEMORIA* de Salvador Dalí. Pintado en 1931, este cuadro, que se expone en el Museo de Arte Moderno de Nueva York, evoca por medio de sus "relojes blandos" la relación entre el espacio y el tiempo.

solución propuesta el devenir sería “real” (Heráclito), en la segunda “ilusorio” (Parménides).

Paul Ricoeur ha observado que esas opciones no se solapan por entero; si se quiere explicar todos los fenómenos habrá que tomar prestado de una aquello que a la otra le falta. Aristóteles, por ejemplo, define en su *Física* el tiempo como “el número del movimiento según un antes y un después”, para afirmar luego que “si no se admite la existencia del numerante es también imposible la del numerable, por lo que, obviamente, no existirá siquiera el número”. En otras palabras, el tiempo no existe si no hay alguien para percibirlo. Newton lo solucionará diciendo que el tiempo, como variable de los fenómenos físicos, no tiene nada que ver con el tiempo de la percepción. Kant habla del tiempo como una forma *a priori* del conocimiento, esto es, como algo dado en la naturaleza (al hombre), pero a la vez lo vuelve “invisible”, en el sentido de que la dimensión temporal del conocer no es tiempo realmente vivido.

Por otra parte, San Agustín explica perfectamente los aspectos subjetivos del tiempo (presente, pasado, futuro, el fluir, etc.). Mas, a la hora de considerar la duración, se remite a fenómenos físicos como el movimiento de los astros, o sea, hechos considerados objetivos. Brentano y Husserl son inalcanzables en el análisis fenomenológico de la conciencia interna del tiempo, pero a costa de metáforas correspondientes al tiempo objetivo.

Parece, opina Ricoeur, como si a la perspectiva naturalista le faltara la capacidad de construir un presente a partir del instante y que a la perspectiva mentalista le faltara capacidad para explicar de forma satisfactoria el durar.

Ante esa situación de equilibrio, ¿podría la psicología inclinar el fiel de la balanza en favor de una u otra interpretación? Los psicólogos se ocupan de los fenómenos mentales, pero en sus investigaciones describen los estímulos, que son hechos físicos, y los procesos que tienen lugar en el sistema nervioso central.

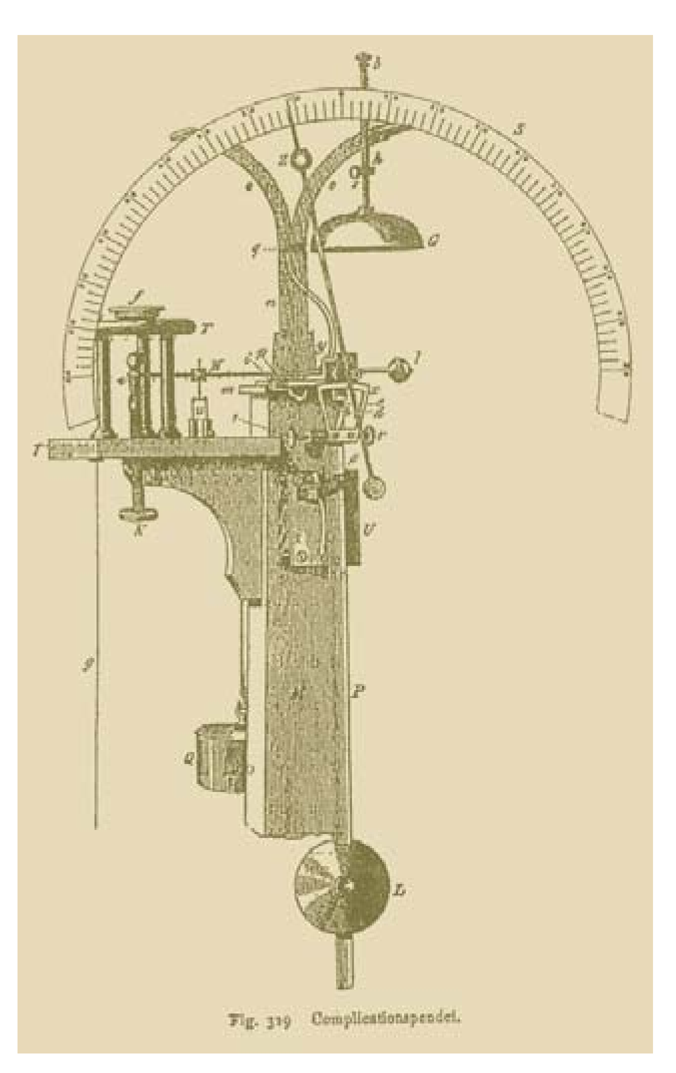
La historia de la psicología nos enseña que lleva casi dos siglos de investigación experimental dedicada al tiempo. La multiplicidad de enfoques y de cuestiones abordadas a lo largo de 180 años es tal, que se convertiría en un despropósito intentar resumir los principales puntos de vista. Me limitaré a la descripción de algunos experimentos que pueden ayudar a comprender mejor los métodos con que los psicólogos se enfrentan al problema y razonan sobre los resultados.

El desplazamiento temporal

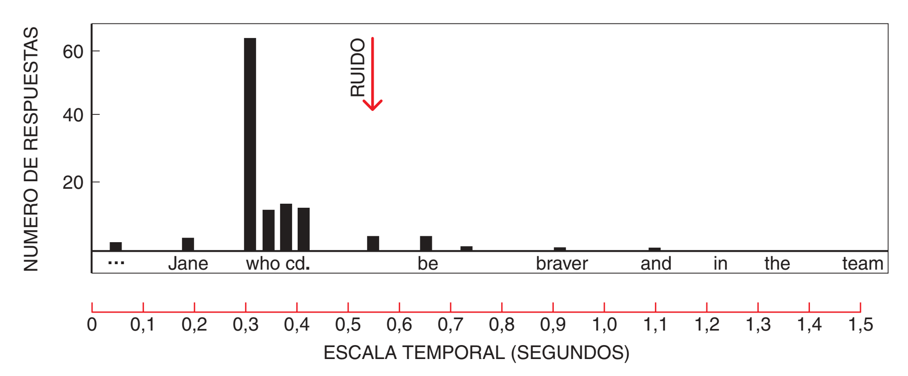
A principios de siglo, Wilhelm Wundt empleó para sus experimentos el péndulo de complicación. Con él hacía girar a bastante velocidad una aguja sobre un cuadrante y provocaba el sonido de una campanilla durante su movimiento. Los individuos debían indicar en qué punto se encontraba la aguja en el momento en que percibían el sonido. Obtuvo las respuestas más dispares. Algunos situaban el estímulo acústico en un punto antecedente al real (desplazamiento negativo), otras en un punto subsiguiente (desplazamiento positivo); casi nadie en el punto justo. Así, un fenómeno de simultaneidad física (la aguja en un punto concreto del cuadrante y el sonido de la campanilla) se transformaba en una sucesión psicológica (el punto del cuadrante se localiza antes o después de que suene la campanilla).

No tardaron en proponerse dos hipótesis. La primera se basaba en la distinta “velocidad de las sensaciones”. Se sabe que la latencia de la sensación visual es al menos diez veces mayor que la de la sensación auditiva; fenómeno que explicaría, cuando menos, los casos en que el sonido se sitúa en un punto anterior al real (el sistema visual aún tiene que elaborar las señales luminosas asociadas contemporáneamente al sonido de la campanilla). No puede, sin embargo, explicar los casos en que el sujeto localiza el sonido de la campanilla más allá de donde se produjo, pues ello indicaría que la sensación auditiva habría sufrido un “retraso”. Pero, ¿por qué? Aquí entra la segunda hipótesis (que era también la de Wundt): el desplazamiento se debe a la atención, por cuanto el estímulo, cuya aparición se espera, se elabora y advierte antes que los demás. Si el observador concentra su atención en el movimiento de la aguja, el sonido se oirá con retraso y se localizará en un tiempo posterior al exacto.

El fenómeno del desplazamiento temporal se ha estudiado a fondo, con fortuna diversa, aunque sin llegar a conclusiones firmes. En los años cuarenta, Edgard Rubien (psicólogo danés que ideó la famosa figura



2. EL “PENDULO DE LAS COMPLICACIONES” con el que Wilhelm Wundt estudió a finales del siglo pasado el fenómeno del desplazamiento temporal. Durante la rotación de la aguja sobre el cuadrante sonaba un timbre. El observador tenía que indicar el punto de la escala que señalaba la aguja en el momento en el que se había oído el timbre.



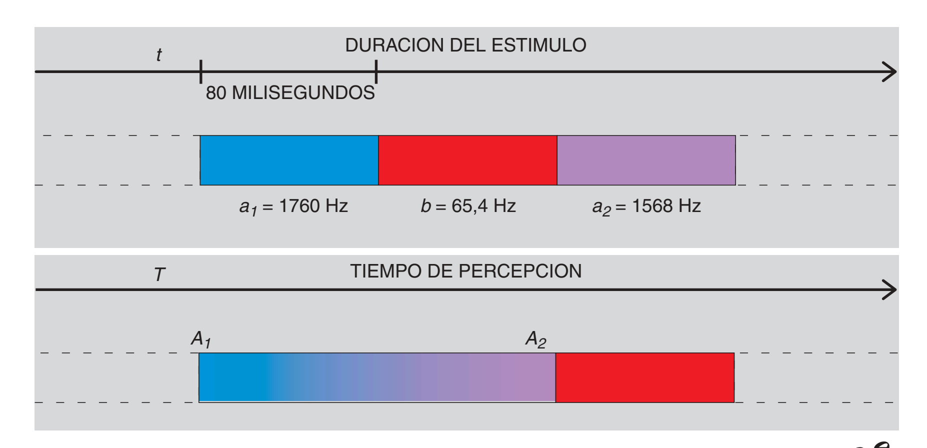
3. EN EL EXPERIMENTO DE LADEFOGED Y BROADBENT, cuando se introduce un ruido en una frase, el observador lo suele situar en un punto distinto de aquel en que se produce. En la ilustración, la posición real del ruido es la que marca la flecha vertical. La columna negra muestra que al menos la mitad de los 121 participantes en el experimento lo localizó en un punto de la frase unos 250 milisegundos anterior al punto exacto.

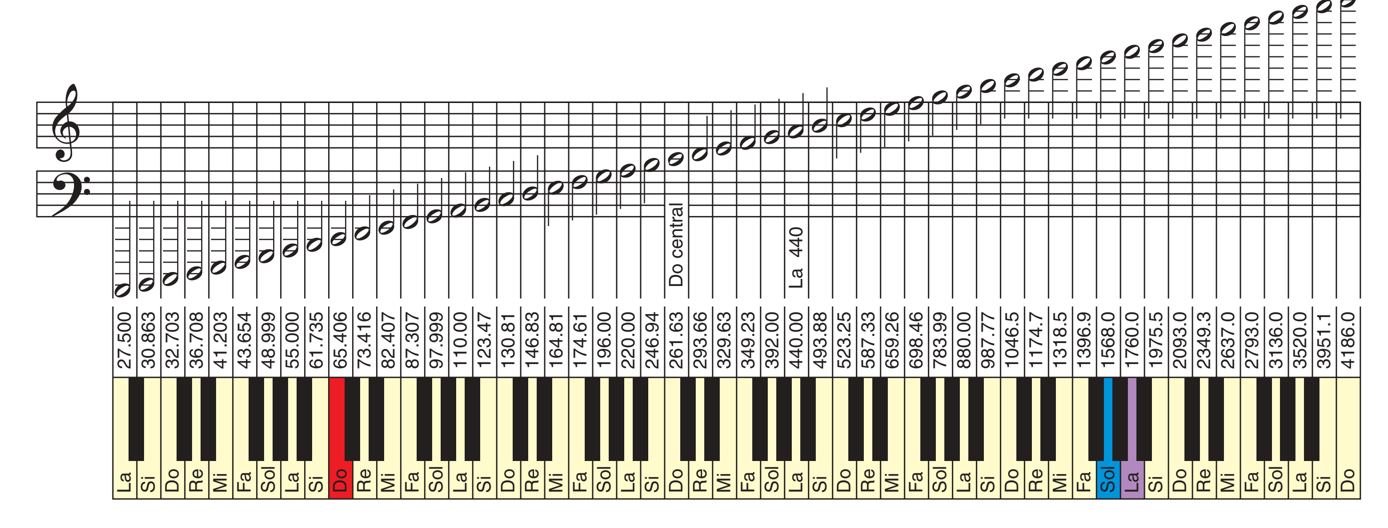
reversible de la copa y los perfiles humanos) utilizó secuencias de tres sonidos brevísimos, dos iguales y uno distinto (golpe de martillo-timbre-golpe de martillo) y obtuvo desplazamientos temporales con una misma modalidad sensorial (de esta forma evitaba la explicación basada en velocidades de sensación diferentes para modalidades sensoriales distintas).

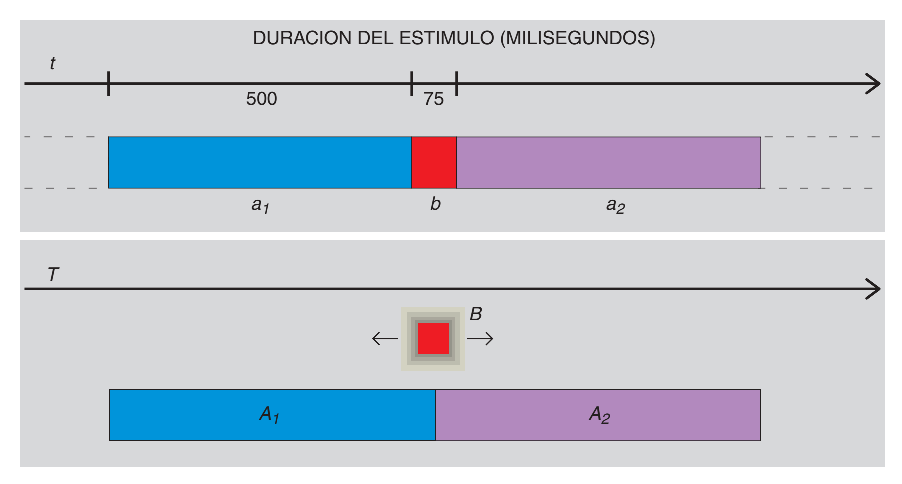
Se comenzó a considerar la heterogeneidad de los estímulos como factor responsable del desplazamiento. A este propósito resulta muy ilustrativo un experimento realizado por P. Ladefoged y D. E. Broadbent. Tomaron la grabación de una frase en una de cuyas palabras insertaron un ruido muy breve. Los sujetos debían indicar en qué palabra se percibía el ruido. La frase era "*We thought it was Jane who could* [sonido] *be braver and in the team*". Al menos la mitad de los sujetos situaron el sonido 250 milisegundos antes de que se produjera. Nótese que ésta es una sola de las dos posibles lecturas: con idéntica fuerza podría sostenerse que el sonido se había oído en el momento "justo" y que la frase entera era la que estaba desplazada 250 milisegundos. Volveremos sobre esta posibilidad cuando hablemos del movimiento estroboscópico.

He estudiado el fenómeno del desplazamiento temporal perfeccionando el experimento de Rubin. En vez de ruidos, cuya disimilaridad es difícil de cuantificar, he usado sonidos puros de los diferentes tonos, de tal forma que su variación se pudiera medir según la diferencia de frecuencias entre los sonidos implicados. Dada una secuencia de estímulos de tipo [a_1–b–a_2], en los que a_1 y a_2 son fijos a 1760 y 1568 hertz, he asignado a b una frecuencia progresivamente descendente de 1661, 1397, 1109, 392 y 65,4 hertz. Cada estímulo tenía una duración de 80 milisegundos y no existían pausas entre ellos. Si fuera válida la hipótesis de la constancia, la secuencia de estímulos [a_1–b–a_2]

4. LAS ILUSTRACIONES muestran el fenómeno de desplazamiento temporal de estímulos acústicos. Tomemos la secuencia [a_1-b-a_2] en el tiempo físico *t*. Si el estímulo central (*b*) tiene una frecuencia que difiere de forma notable (cuatro octavas) de las de los estímulos laterales, y escogemos estímulos muy breves (80 milisegundos), lo que se oye en el tiempo fenoménico *T* es una sucesión distinta [A_1-B-A_2]. Los sonidos más agudos, que en realidad difieren en un tono, se escuchan seguidos y el sonido intermedio, más grave, se ve relegado al final de la sucesión.







5. EN EL TIEMPO FISICO *T* el estímulo *b*, aunque sea muy breve, tiene una situación precisa e invariable. En el tiempo fenoménico *T*, el sonido *B* ya no separa A_1 y A_2 y se confina en un momento imprecisable mientras que los sonidos laterales se suceden de forma ininterrumpida.

debería dar lugar a la sucesión de percepciones [A_1–B–A_2]. Pero los participantes en el experimento sostuvieron haber oído la sucesión [A_1–A_2–B] en una frecuencia que llegaba al cien por cien cuando la distancia tonal entre las notas terminales y la central era de al menos cuatro octavas. Parece así demostrado que una secuencia de estímulos no homogéneos es más propicia para la producción de desplazamientos temporales.

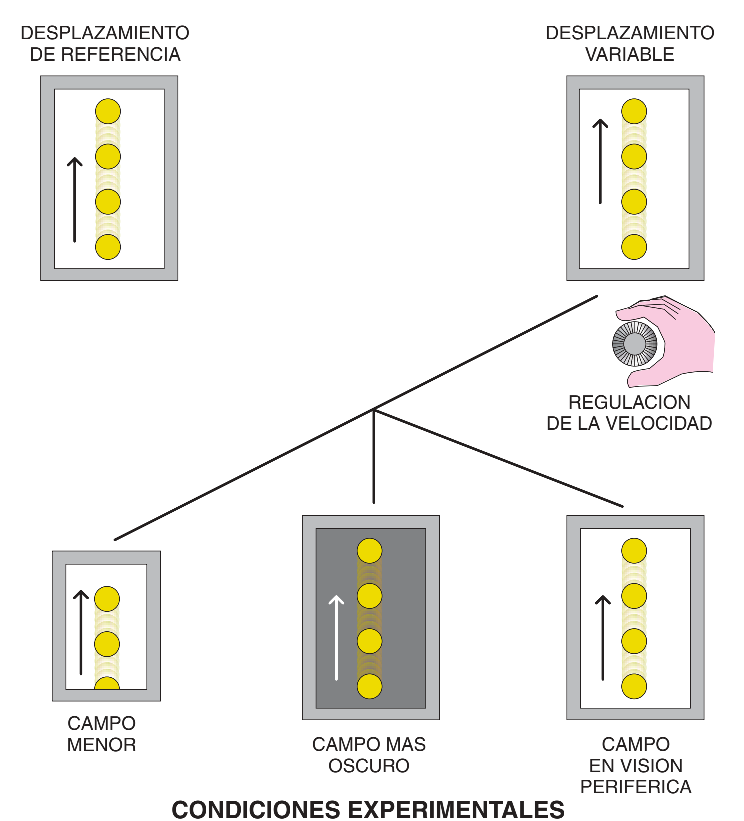
En este fenómeno resulta también decisiva la duración de los estímulos. Si mantenemos fijas las frecuencias de los estímulos [$a_1 = 1760$; $b = 82{,}4$; $a_2 = 1568$] y se les asigna la misma duración, progresivamente decreciente, la probabilidad de que la secuencia [a_1–b–a_2] se oiga como [A_1–A_2–B] es nula para $d = 3000$ milisegundos y próxima al 80 por ciento para un valor de $d = 75$ milisegundos. En conclusión, la correspondencia entre las secuencias de estímulos y de percepciones es tanto más débil cuanto mayor sea la diferencia entre los estímulos y menor su duración. (Todavía no ha quedado explicado por qué el desplazamiento de *b* se produce positivamente hacia el final en lugar de hacia el principio.)

Revisten especial interés las series en que se mantiene un tono [*b*] brevísimo (75 milisegundos) mientras [a_1] y [a_2] se alargan progresivamente, por ejemplo hasta 500 milisegundos. Al principio, *B* se percibe después del par [A_1–A_2] y, muy a menudo, tras una corta pausa. Pero a medida que se alargan las dos notas terminales, su localización temporal resulta más y más incierta, hasta que parece flotar sobre dos notas A_1 y A_2 que se suceden sin pausa intermedia (la que se esperaría por el desplazamiento de *B*, que se ha colocado al final o se ha superpuesto a los otros sonidos).

¿Cómo interpretar estos hechos? Por un lado, resulta evidente que la relación antes/después existente en los estímulos físicos no se respeta entre los perceptos relativos; semejante falta de correspondencia no puede atribuirse a ningún proceso fisiológico. Por otro lado, se descubre que la relación antes/después de los perceptos viene establecida por la razón de semejanza entre los propios perceptos. No parece sencillo explicar de qué modo relaciones específicas no temporales (semejante/disímil) puedan interaccionar con relaciones temporales (antes/después).

Estamos acostumbrados a pensar que lo que ocurre antes sucedió antes; dígase lo propio de lo acontecido después, cualquiera que sea el instante real. Nos deja perplejos que aquello que es válido en el campo de la física no lo sea en el de la percepción. A todo ello se añade que, en determinadas condiciones (en el experimento, dos tonos largos seguidos de un tono muy breve), resulta incluso difícil localizar temporalmente una percepción concreta.

Paul Fraisse sostiene que en la percepción de las relaciones temporales entre acontecimientos se producen sensaciones tanto de simultaneidad y de sucesión (que antes atribuíamos a los sucesos físicos o fisiológicos) como de no simultaneidad y no sucesión (que no tienen significado físico ni fisiológico); para que se puedan producir sensaciones claras de simultaneidad y de sucesión es necesaria cierta semejanza cualitativa de los estímulos, sin la cual desaparece la percepción de orden. Pensemos en lo que escuchamos por el auricular del teléfono cuando se



6. EXPERIMENTO ideado por J. F. Brown. En un campo iluminado, unos discos se mueven a una velocidad conocida (estímulo de referencia). El sujeto observa el movimiento de los mismos discos en otro campo (estímulo variable) y debe regular su velocidad hasta igualarla a la del estímulo de referencia. Si el estímulo variable es idéntico al de referencia, la equiparación es correcta, pero si aquél tiene un campo menor, más oscuro o sólo puede verse con el rabillo del ojo, el sujeto debe reducir mucho la velocidad de los discos para que le parezca que tienen la misma velocidad que los de referencia.

aprieta la tecla de repetición de llamada: se produce una rápida sucesión de sonidos claros y distintos, pero resultaría difícil precisar con cuál de ellos empieza o termina la sucesión o cuáles son las relaciones antes/después entre dos sonidos (a menudo incluso nos parece escuchar más o menos sonidos de los que en realidad se han producido).

De inmediato se advierte la importancia de la conclusión de Fraisse. Estamos acostumbrados a considerar el tiempo psicológico como proyección del tiempo físico, pero los resultados de las investigaciones nos dicen: *a*) que en el tiempo psicológico las relaciones antes/después no tienen una dependencia exclusiva de la secuencia real de los estímulos; *b*) que los factores decisivos en la formación de las relaciones del tipo antes/después propias del tiempo psicológico no tienen naturaleza temporal; *c*) que las relaciones de sucesión en el tiempo psicológico no se agotan con la alternativa simultaneidad/sucesión: en condiciones especiales tenemos la impresión de no poder decidir sobre las características de las relaciones. Todo ello es más que suficiente para hacernos dudar de que el tiempo psicológico tenga realmente algo que ver con el tiempo físico.

El experimento de Brown y las paradojas del movimiento

En los años treinta J. F. Brown realizó una serie de experimentos en los que se pedía a los participantes que igualaran la velocidad de unos discos en movimiento colocados en el interior de dos bastidores. En el experimento, el sujeto observaba lo que sucedía dentro del bastidor de la izquierda y con un mando regulaba la velocidad en el bastidor de la derecha, hasta que consideraba que las dos velocidades eran iguales. Brown descubrió que la velocidad final en el bastidor de la derecha se sobrestimaba si éste era menor, más oscuro o si sólo se veía por el rabillo del ojo (visión periférica): para igualar las dos velocidades perceptivas es necesario reducir la velocidad física en el bastidor de la derecha.

Al comentar los experimentos de Brown, K. Koffka razonó como sigue. Sea $v = s/t$ la relación entre velocidad, espacio y tiempo físicos y sea $V = S/T$ la relación entre velocidad, espacio y tiempo fenoménicos (perceptos); si $V > v$, tal como nos indican los experimentos de Brown, el único modo de mantener la relación es aquella que supone que $T < t$. En otras palabras, el tiempo fenoménico discurre en la percepción a velocidades diferentes, concretamente más altas en campos pequeños, oscuros y periféricos.

Esta conclusión, aparentemente impecable desde el punto de vista de la lógica y de los conocimientos físicos, es muy discutible en cuanto la contrastamos con la experiencia. Si me asomo a la ventana y observo los vehículos que circulan por la calle, el tiempo fenoménico en el que hemos de considerar los acontecimientos percibidos es único, no fraccionado o estratificado: el tiempo corre a la misma "velocidad", independientemente de si contemplo el tráfico en la calle (que es estrecha) o en la plaza (más ancha), mire con atención los automóviles que pasan debajo de mi ventana o atisbe con el rabillo del ojo los que se encuentran en la periferia de mi campo visual. Todo ello sucede en un mismo y único "tiempo". No tiene sentido hablar de "velocidad" del tiempo. ¿Con qué eje de tiempo de orden superior mediríamos la velocidad del tiempo ordinario?

El sofisma de la conclusión criticada reside en creer que el espacio físico se transforme en espacio fenoménico, que la velocidad física se transforme en velocidad fenoménica, que el tiempo físico se transforme en tiempo fenoménico y que exista la misma relación entre velocidad, espacio y tiempo fenoménicos y físicos. Si tenemos en cuenta que existe la percepción de velocidad incluso en ausencia de movimiento, entenderemos que es muy necesario ser muy prudentes en el manejo de algunas nociones.

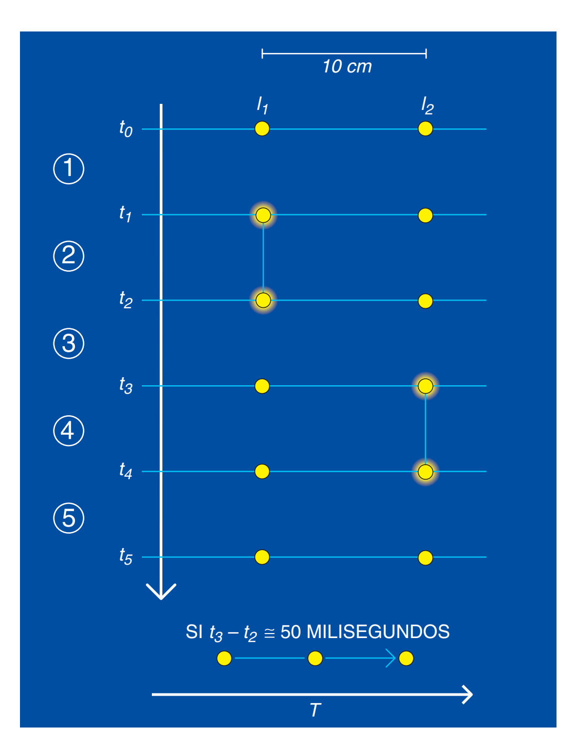
En mi departamento, en colaboración con E. Zambianchi, estamos efectuando algunos experimentos sobre la percepción de continuidad en el cambio. Utilizamos un disco de 20 milímetros de diámetro que pasa del color negro progresivamente al blanco (o viceversa, atravesando por 222 grados de luminosidad en un lapso de cinco a seis segundos). Al principio se observa un disco estable de color negro que poco a poco se decolora, atraviesa muy deprisa los tonos intermedios y vuelve a ralentizar su viraje en la proximidad del blanco hasta alcanzar un color blanco estable.

Si la velocidad constituye, pues, una propiedad fenoménica que se percibe en ausencia de movimiento, no podremos establecer una relación cuantitativa con el espacio visible recorrido (en el caso del cambio de luminosidad no se recorre espacio alguno), ni con el tiempo

7. MODELO NEUROFISIOLOGICO de la percepción del movimiento. Los dos estímulos, l_1 y l_2, llegan a los campo receptores c_1 y c_2 de forma sucesiva en tiempos t_1 y t_2. El proceso elicitado en c_1 entra en el circuito de demora *r* y permanece disponible durante un tiempo t_3-t_2. El proceso elicitado en c_2 se transmite sin retardo y ambos procesos llegan en el mismo instante al circuito comparador *cc*. El resultado de su comparación se envía en el tiempo *tx* a una unidad perceptiva especial *m* que dará lugar en el tiempo *ty* a la visión del movimiento y de su dirección.

físico empleado. En otras palabras, podemos imaginar que exista una relación entre la velocidad y el tiempo fenoménicos ($V = fT$); ahora bien, si en algún caso no existe S (desplazamiento en el espacio) y seguimos teniendo la sensación V, no podremos sostener que $V = S/T$. (En estas observaciones no hay nada nuevo: también los ritmos aparecen veloces o lentos, sin que haya desplazamiento en el espacio.)

En conclusión, si admitimos que el espacio, el tiempo y la velocidad percibidos mantienen entre sí las mismas relaciones que se observan entre las correspondientes dimensiones físicas, incurrimos en una paradoja insostenible. Podemos aceptarlo como un hecho natural aunque se oponga a nuestra experiencia diaria, pero parece más racional revisar las premisas de que hemos partido y rendirse ante la evidencia de los hechos. Hay que reconocer que la métrica del tiempo fenoménico no es la del tiempo físico y que el tiempo fenoménico muestra relaciones insospechadas con otros aspectos de la percepción que no tienen nada que ver con el tiempo: en el caso del efecto Brown, con el espacio fenoménico en que acontece el suceso e incluso con el nivel de luminosidad del campo.



8. PARADIGMA DE LA ESTIMULACION necesaria para conseguir el movimiento estroboscópico. Las dos fuentes inmóviles, l_1 y l_2, se encienden y se apagan según las fases indicadas (*de arriba abajo*). Lo que se observa, en condiciones apropiadas, es una luz que se mueve de izquierda a derecha. La iluminación que se utiliza en las ferias o con ocasión de la Navidad (*página siguiente*) es un ejemplo de movimiento aparente ligado a las fases de encendido de fuentes de luz fijas.

La ilusión del movimiento

Se llama estroboscópico o aparente el movimiento que se percibe pese a hallarse quietas las fuentes de estimulación. El movimiento aparente se consigue con un dispositivo ideado por Max Wertheimer en 1912. Sean l_1 y l_2 dos fuentes luminosas, situadas en un plano frontal y paralelo, separadas unos 10º, esto es, unos diez centímetros para un observador que esté a unos 57 centímetros de distancia. Al principio se observa un campo uniformemente oscuro (fase 1, $t_0 - t_1$). Sucesivamente se enciende l_1 durante, pongamos, un segundo (fase 2, $t_1 - t_2$). Se apaga luego la fuente l_1 y el campo vuelve a la oscuridad (fase 3, $t_2 - t_3$). La duración de esta fase tercera es crítica. Ahora se enciende la luz l_2 y permanece encendida durante un segundo (fase 4, $t_3 - t_4$). Al final, ambas luces deben estar apagadas (fase 5, $t_4 - ...$).

¿Por qué es crítica la duración de la fase 3? Si se fija una duración menor de 10 o mayor de 100 milisegundos (estos valores pueden variar en función de la distancia entre las luces y de su luminosidad) se verá que ambas luces se encienden a la vez, o bien que una lo hace después que la otra, pero permaneciendo inmóviles. Si la fase 3 dura unos 50 milisegundos, se ve una única luz que se desplaza de l_1 a l_2. Esto es el movimiento estroboscópico: las fuentes luminosas (diodos semiconductores, por ejemplo) no se desplazan, pero la luz que emiten viaja de uno al otro.

El movimiento estroboscópico constituye un problema para los psicólogos de la percepción, porque sea cual sea la solución que se adopte (las principales son dos, una fisiológica y otra informática) es fundamental para explicar la mayoría de los fenómenos percibidos conocidos. Y entre estos fenómenos se encuentra también el tiempo psicológico. Veamos de qué se trata.

El movimiento del punto luminoso, de izquierda a derecha, se verifica en la oscuridad de la fase 3. Se inicia en el instante físico t_2 y termina en t_3. Si no se enciende la fuente (el diodo semiconductor, por ejemplo) en l_2, no se observará movimiento alguno: la luz de la izquierda se encenderá y apagará sin moverse de sitio. De ello se sigue que la causa del movimiento, en el trayecto que va de l_1 a l_2, hay que buscarla en el encendido de l_2. Pero el encendido de l_2 tiene lugar cuando ya se ha apagado l_1 e incluso ha transcurrido un intervalo de oscuridad de unos 50 milisegundos. A menudo se supone que el orden de las percepciones es una consecuencia directa del orden de los procesos fisiológicos subyacentes y que, por tanto, el proceso concomitante con la llegada de la luz de l_1 debería preceder al proceso concomitante con la llegada de la luz de l_2. Pero, ¿cómo consigue la luz de l_1 "llegar a tiempo" cuando desconoce si al cabo de 50 milisegundos se encenderá el diodo semiconductor en l_2?

Los neurofisiólogos han aportado una respuesta. Las fuentes l_1 y l_2 activan los campos receptores c_1 y c_2 que corresponden a las diferentes áreas de proyección sobre la retina de l_1 y l_2. Primero se activa c_1 y luego c_2, con el intervalo de tiempo físico t_3-t_2 entre estímulos. Pero el proceso iniciado con c_1 no se elabora inmediatamente; entra en un circuito de demora r para ser enviado al circuito comparador cc. Mientras tanto, el estímulo proveniente de l_2 incide sobre el campo receptor c_2, cuya señal se envía directamente al circuito comparador. Este último realiza una cierta elaboración y da luego una señal a una unidad especial m que produce la respuesta perceptiva "veo el movimiento, de izquierda a derecha".

Otro modelo neurofisiológico parecido sobre la visión del movimiento, que recogen los manuales, conduce a consecuencias paradójicas Si el circuito de comparación debe atender la llegada del segundo estímulo (tomado en consideración 200 milisegundos después) para decidir si los estímulos se refieren a un movimiento y en qué dirección, se debe concluir que todo el movimiento se ve con retraso, tras un intervalo que puede durar hasta 200 milisegundos. Y esto es así porque, si bien la causa del



movimiento que percibimos es el encendido de l_2, nosotros no vemos el movimiento de l_2 a l_1, sino de l_1 a l_2. En otras palabras, no vemos el movimiento “en directo”, sino su moviola: una quinta parte de segundo no es mucho, pero queda claro que, cuando vemos los desplazamientos físicos, éstos ya han ocurrido.

Esta aporía se resuelve al distinguir entre el movimiento percibido y la reacción motora a los sucesos físicos en el ambiente. Es el punto de vista que aparece de ciertos experimentos de B. Libet, que sostiene haber demostrado que la reacción motora se produce 300-400 milisegundos antes de que el área cortical correspondiente a la visión de un estímulo alcance su pleno funcionamiento. La representación perceptiva de un instante dado incluiría referencias a lo que sucederá en el instante siguiente y “estas referencias y ajustes subjetivos se desarrollan en la esfera mental, mientras que no se evidencian como tales en las actividades neuronales”.

Las reacciones motoras se producirían según los tiempos propios de la elaboración de los estímulos dentro del sistema nervioso central, mientras que la representación consciente de los sucesos tendría lugar en tiempos propios más largos y se mezclarían hechos pasados con hechos futuros (en un intervalo de tiempo físico muy corto). El movimiento estroboscópico sucedería en el tiempo subjetivo, después de haberse comparado diversos indicios diseminados en el tiempo físico de los procesos nerviosos. En el caso del desplazamiento de los estímulos acústicos, la posición del tono distinto de los otros dos se decidiría sólo después de haberse oído todos ellos.

De los fenómenos descritos se deduce que no es posible establecer una correspondencia biunívoca entre los instantes del tiempo físico y los momentos del tiempo psicológico. No se deben entender los sucesos percibidos durante un intervalo de tiempo físico como pañuelos tendidos al sol, ordenados a lo largo de un cordel. El fluir y la continuidad del tiempo psicológico son, en cierto modo, independientes del fluir y de la continuidad del tiempo físico.

Análisis del tiempo según el esquema de Fraser

Me he limitado a merodear algunos problemas de psicología del tiempo, haciendo referencia a hechos y experimentos, para dar al lector una idea del objeto y de los métodos de investigación, más que para ofrecer una solución específica a tales problemas. Se trata de investigaciones sobre el orden en sucesiones, sobre las relaciones entre espacio y tiempo y “detalles” emparentados, mientras se esquiva el problema capital, la percepción del tiempo y su valoración cuantitativa (el tiempo que “pasa”).

Hoy en día se realizan muchos experimentos con modelos informáticos y sujetos experimentales a los que se pide que juzguen cuánto dura cierto evento o cuánto tiempo ha pasado desde que se da una señal; estos modelos se caracterizan en su mayoría por fundarse en la hipótesis de que existan contadores internos que tendrían como base fenómenos cíclicos recurrentes en el organismo (desde ritmos circadianos a ondas electroencefalográficas). Pero ninguno de los teóricos que proponen este modelo parece tener en cuenta la objeción aristotélica, según la cual, sin un observador que interprete estos relojes, no existe tiempo ni duración. Tampoco parecen tomar en consideración la observación de Husserl: al estimar la duración de un suceso no podemos saber si se evalúa la duración del suceso mismo o la del acto consciente en el que se observa el evento.

En realidad, bien poco puede hacer la psicología por aclarar si el tiempo es algo dado en la naturaleza o, como decía San Agustín, *distentio animi*. Tras una reflexión madura, el tiempo aparece como un objeto de investigación del que se puede hablar de muchas maneras, sin que sean el físico ni el psicológico puntos de vista privilegiados. Aún más evidente aparece el asunto si se toman en consideración los hechos que ahora paso a describir.

En primer lugar, el tiempo parece un atributo de la conciencia vígil: se interrumpe durante el sueño y vuelve a fluir al despertarnos. Para asegurar una eficiente coordinación del comportamiento con el ambiente (me refiero a la utilización de las experiencias vividas o interrumpidas) se hace necesario definir de nuevo nuestras coordenadas temporales, algo que no tiene nada de psíquico o físico. Si al bajar una calle nos vemos rodeados de coches tirados por caballos, hombres ataviados con levita y farolas de petróleo, empezaremos a dudar de estar en el lugar apropiado, y si observamos otros pequeños indicios (billetes de banco, diarios, aspecto de los edificios), concluiremos que estamos en pleno siglo XIX, al tiempo que nuestro mundo de fin de siglo XX se desvanecerá de forma progresiva hasta no tener más realidad que la

9. ESTE DETALLE DE UNA PINTURA conservada en el archivo estatal de Siena muestra una reunión de la comisión nombrada en 1576 por el Papa Gregorio XIII para estudiar la reforma del calendario juliano, en el que se había calculado un error de diez días. Como se observa por los signos zodiacales, los expertos propusieron restar esos días al mes de octubre.



de un sueño o un recuerdo. Esta es una ficción literaria, pero tenemos el ejemplo de ciertas patologías bien conocidas que resultan muy elocuentes. Yo mismo he podido comprobarlo en el comportamiento de un hombre que despertó después de veintidós días en coma: al principio negó las afirmaciones de los médicos, enfermeras y parientes de que estábamos en el mes de mayo y no en abril; luego se plegó a la evidencia de los hechos, pero dando signos manifiestos de hacerlo para vivir tranquilo, no por convicción.

Otra noción del tiempo es la que lo identifica con una sucesión de días y años en la que cada uno de ellos lleva su etiqueta. El hombre vive también este tiempo, que no tiene naturaleza estrictamente psicológica, sino cultural (nuestro tiempo se desarrolla de manera rectilínea, según la tradición judeocristiana, y no de forma cíclica, según la tradición clásica) y social (pues se comparte el modo de ver y medir el devenir externo). Este tipo de tiempo es real en el pleno sentido del término, como lo demuestran los efectos que produce: el pueblo romano se rebeló cuando Gregorio XIII eliminó por decreto los días que iban del jueves cuatro de octubre al viernes quince de octubre de 1582, porque le pareció que le habían robado diez días de vida. Un comportamiento absurdo si razonamos en términos de tiempo físico o fisiológico (todos los instantes son iguales y el envejecimiento tiene ritmos que no dependen del calendario), pero menos absurdo si lo razonamos en términos de una representación social del tiempo (hecha de relojes, calendarios e historia).

Entre aquellos que estudian el tiempo, incluidos los psicólogos, está ganando adeptos la opinión de que el tiempo mismo no es una realidad o un modelo de tipo unívoco, sino una entidad que se puede considerar desde muy diversas perspectivas. Según J. T. Fraser existen al menos seis niveles de análisis del tiempo:

(I) atemporalidad: en un mundo en el que sólo haya radiación electromagnética, el tiempo no existe (si en cierto instante se emite un fotón y se absorbe un año después, los dos sucesos, en lo que se refiere al fotón, acontecen simultáneamente);

(II) prototemporalidad: en el mundo de las partículas elementales el tiempo es fragmentario (no continuo), no fluye y carece de dirección; la singularización de instantes concretos no tiene significado y los sucesos sólo se pueden situar de forma estadística;

(III) eotemporalidad: es el mundo de la materia dotada de masa; aquí el tiempo es continuo, pero inmóvil y carente de dirección; no pueden aplicarse los conceptos de pasado, presente y futuro (indiferencia respecto al tiempo de las leyes de la mecánica);

(IV) biotemporalidad: es el mundo de la materia viviente; el tiempo tiene un sentido (fenómenos dominados por la entropía); existe distinción entre pasado, presente y futuro, pero los horizontes del pasado y del fu-

GIOVANNI BRUNO VICARIO es titular de la primera cátedra de psicología general de la Universidad de Padua. Investigador de las percepciones auditivas y visuales, es defensor de la teoría de la Gestalt.

turo son ilimitados, si se comparan con los del hombre; los límites del presente son probablemente estables y característicos para cada especie animal;

(V) nootemporalidad: es la realidad de la mente humana adulta; existe una clara distinción entre pasado, presente y futuro y los horizontes son ilimitados; el presente mental tiene horizontes que varían en función de la atención;

(VI) sociotemporalidad: es el mundo de los relojes y de los calendarios, o sea, del tiempo compartido, distribuido y valorado de modo colectivo por los seres humanos.

La simple propuesta del esquema de Fraser puede ayudar a entender que el problema general del tiempo no puede abordarse con el prejuicio de que sólo el tiempo físico es "real", ni sustituyéndolo por el psicológico (que al menos tiene la ventaja, sobre el físico, de comprender un mayor número de propiedades del tiempo que de las que tenemos experiencia).

El esquema pone de manifiesto que el tiempo no presenta los mismos atributos (duración, continuidad, dirección, etc.) en todos los niveles de análisis de los fenómenos temporales. De forma más concreta, los atributos se acumulan en el paso de un nivel al siguiente, hasta llegar al nivel VI, en que se dan todos ellos, según la lógica ya ilustrada por Lorenz en el análisis de los comportamientos, desde las reacciones homeostáticas más sencillas a las más altas prestaciones de la inteligencia. Llegados a este punto, la asunción del tiempo de la física (nivel III) como patrón de medida de cualquier experiencia temporal parece inapropiada, porque algunos de los atributos del tiempo (por ejemplo, la noción del presente, que se encuentra tan sólo en psicología) carecen de significado en física. La objeción más frecuente —sólo la física se ocupa de la "realidad" y cuanto no encaja en los sistemas físicos es "ilusión"— se justifica por la autoridad reconocida de esta disciplina, pero se trata de una objeción carente de fundamento, porque las opiniones divergen, desde hace milenios, sobre la naturaleza de lo "real".

Por otra parte, también parece inapropiado tomar como patrón el tiempo de la psicología: si bien incorpora todas las características de los niveles inferiores, no explica las del nivel superior, el VI. En la ficción y en el ejemplo patológico antes mencionados, se advierte que la continuidad de las experiencias antecedentes a la pérdida de consciencia (por el sueño o el coma) con las sucesivas a la recuperación del estado de vigilia no depende de hechos internos del yo, sino de indicios extraídos del entorno. La sensación de vivir en el tiempo "apropiado" no obedece a reglas psicológicas, como sí sucede en el caso de las percepciones, las emociones o el pensamiento, sino que debe adecuarse a un esquema colectivo cuya "realidad" se demuestra por su resistencia a cualquier tentativa de alterarlo, por buenas que sean las razones (de los médicos en bien del paciente, de Gregorio XIII para con el pueblo romano).

En definitiva, el tiempo sigue siendo un problema cuya solución no se vislumbra. Confinar el tiempo de la física al ámbito de los fenómenos de que se ocupa la física es obligado. Pero incluir a la psicología no hace sino descubrir una complejidad ulterior. A pesar de esto, los conocimientos acumulados por la psicología tras más de 150 años de investigaciones experimentales legitiman al menos una conclusión. La mayoría de los atributos del tiempo de los que tenemos experiencia no se pueden explicar con los atributos propios del tiempo físico en el que acontecen tanto los estímulos que están en el origen de nuestras sensaciones como los procesos fisiológicos que transforman los estímulos en sensaciones. Decir que el tiempo psicológico no tiene nada que ver con el que manejan los físicos es seguramente excesivo, pero da una idea bastante aproximada de la situación.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PSYCHOLOGIE DU TEMPS. P. Fraisse. PUF, París, 1967.

TEMPO PSICOLOGICO ED EVENTI. G. Vicario. Giunti-Barbèra, Florencia, 1973.

LO STUDIO PSICOLOGICO DEL TEMPO. G. Giovanelli y G. Mucciarelli. Capelli, Bolonia, 1978.

COGNITIVE MODELS OF PSYCHOLOGICAL TIME. Dirigido por R. A. Block, LEA, Hillsdale, 1990.

IL TEMPO, UNA PRESENZA SCONOSCIUTA, J. T. Fraser. Feltrinelli, Milán, 1992.

COSCIENZA. D. C. Dennett. Rizzoli, Milán, 1993.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Medición de la electricidad de las gotas de lluvia

Uno de mis mejores amigos de la facultad era Michel North, un irlandés fornido al que, por el color zanahoria de su pelo, le llamábamos Red. Pasaba los veranos trabajando para el Servicio Forestal de EE.UU., encargado de la limpieza de los bosques y atento a los focos de incendios desde las torres de vigía destacadas en las elevadas cimas de la Sierra Nevada de California. Cierto día el sopor de la siesta estuvo a punto de costarle la vida. Cuando el trueno le despertó, ya era tarde para escapar. La base negra del cúmulo tormentoso se cernía directamente sobre él, a decenas de metros por encima del pináculo de la torre metálica. Sin tiempo que perder, colocó en el suelo cuatro jarras de cerveza de vidrio; sobre las jarras, un taburete de madera; sobre éste, acuclilló su cuerpo. No tardó en caer el primer rayo, que sacudió a la torre y a él lo despidió de su aislamiento eléctrico.

La energía de los relámpagos es uno de los fenómenos naturales más impresionantes. La ciencia, sin embargo, no acaba de desentrañar cómo se producen. Está claro que los rayos cósmicos liberan en la atmósfera grandes cantidades de cargas, positivas y negativas, arrancando electrones de los átomos del aire. Esas cargas se reúnen en las gotas de agua que forman una nube de tormenta. Pero ni siquiera los especialistas en el tema están muy seguros de cómo las gotas adquieren decenas de millones de cargas en exceso, positivas o negativas. Y sigue siendo todo un misterio por qué esas gotas cargadas se las arreglan para separarse unas de otras, formando en el seno de la nube unas zonas positivas y otras negativas, de intensidad suficiente para generar rayos.

El relámpago es un animal demasiado peligroso para dejarlo suelto en el laboratorio de un aficionado. Pero se trata sólo de uno de los componentes eléctricos de una tormenta. Las gotas de lluvia transportan consigo su carga al caer, quitándosela a la nube y depositándola en tierra. Aunque un relámpago es más espectacular, la precipitación puede transportar más carga hacia el suelo. El dispositivo que aquí se describe permite medir la carga de las gotas.

El aparato en cuestión se basa en la inducción eléctrica. Una gota que caiga por el interior de un cilindro metálico cambiará transitoriamente el potencial eléctrico del cilindro. Una gota cargada positivamente lo elevará mientras que otra cargada negativamente lo rebajará. La amplitud del cambio revela el valor de la carga de la gota. Además, la gota sale del aparato incólume, por lo que pueden hacerse mediciones adicionales. (Podría interesarnos, por ejemplo, determinar su masa. Pero, ¿sabríamos hacerlo?)

Nuestro instrumento está constituido por un tubo de drenaje de plástico de 10 cm de diámetro por 94 cm de largo, algunos embudos de plástico de mismo diámetro, dos cilindros metálicos concéntricos y un puñado de componentes electrónicos.

Por cilindros utilicé dos latas de conservas, que encajaban a la perfección una en otra. Conecté conductores eléctricos para las señales a la cara externa de la lata pequeña y a la cara interna de la lata grande. Las aislé sumergiéndolas en esmalte de látex. Una vez seco el esmalte las monté en el mismo centro del tubo de drenaje, tal como se muestra en la figura 1. En la lata externa arrollé tres vueltas de cinta de espuma de doble cara de 25 mm de ancho. Lograba así un aro de espuma flexible. Hice bien en no desechar la lámina protectora de la última capa, pues pude así deslizar mejor el conjunto hasta centrarlo en su sitio y aprovechar el rozamiento para retenerlo.

Los dos embudos invertidos sobre las latas actúan de deflectores para mantener la sequedad del interior. Y es conveniente disponer de un juego de embudos que actúen de "capuchas". Elegiremos cada capucha de manera que dentro del instrumento penetren las gotas en proporciones manejables. Para un chaparrón, usaremos una capucha de poca abertura; para la llovizna, otra con abertura mayor. El embudo inferior nos permite recoger las gotas para cualquier análisis químico que pudiera interesarnos.

Recortaremos los dos embudos invertidos de suerte que

1. Latas de zumo convenientemente combinadas con embudos y tubos de drenaje permiten medir la carga eléctrica de una gota de lluvia

sus aberturas sean unos dos centímetros más estrechas que la de la lata interna. Para instalar los embudos por encima y por debajo de las latas, necesitaremos dos anillos en el interior del tubo de drenaje. Con sumo cuidado rebanaremos dos trozos cortos del extremo de otro tubo de drenaje y desecharemos cosa de un centímetro de cada anillo; al apretarlos, los anillos deben ajustarse sin huelgo al interior del tubo de drenaje. Con una buena cola pegaremos primero los extremos de los anillos, pegando luego los anillos reconstruidos a los embudos. En el dibujo se ilustra también que hemos de abrir unas ranuras en el tubo; de ellas nos serviremos para untar a conciencia de epoxia el interior del tubo. Ha llegado el momento de empujar el embudo hasta dejarlo en su sitio.

Endurecida la epoxia, depositaremos una pequeña cantidad de pegamento de silicona a lo largo de las junturas para crear un cierre estanco. De lo que se trata es de que las gotas que incidan en este embudo salgan por las ranuras, no que sigan escurriéndose hacia el interior del instrumento. Del mismo modo, hay que tratar con epoxia el embudo del fondo. El instrumento se coloca en una abrazadera de plástico solidaria de una base a prueba de intemperie. Hay que limitarse a introducir el instrumento en la abrazadera sin forzarlo, ni dejarlo fijo para siempre.

Medir la minúscula carga de una sola gota puede que parezca dificilísimo. Barrie Gilbert, de Analog Devices, ha ideado una sorprendente solución para nosotros, que, creo, rompe con los esquemas habituales en lo referente a dichos instrumentos. En su circuitos recurre a trucos ingeniosos que hacen al dispositivo intrínsecamente calibrado (*véase la página SAS Web para detalles*). Además, al emplear dos latas concéntricas y activar la externa con la salida del amplificador, Gilbert convierte la carga de la gota de lluvia en una tensión eléctrica importante, a la vez que reduce las interferencias eléctricas exteriores.

Instalaremos este circuito entre las dos latas, tal como se muestra en la figura 1. Se tiende un cable de cuatro hilos (como el que se usa en los teléfonos) hasta el interior de la casa, donde permanecemos al abrigo de la lluvia.

La forma mejor de trabajar es pasar los datos directamente al ordenador por medio de un convertidor analógico-digital. Pero si no disponemos de él, otra posibilidad es introducir la señal en el circuito de la figura 3. Este detector dual de picos registra exactamente la mitad de la tensión máxima, que puede leerse con un voltímetro digital. La polaridad de la tensión que se obtiene a su salida corresponde a la de la gota analizada, ya sea positiva o negativa.

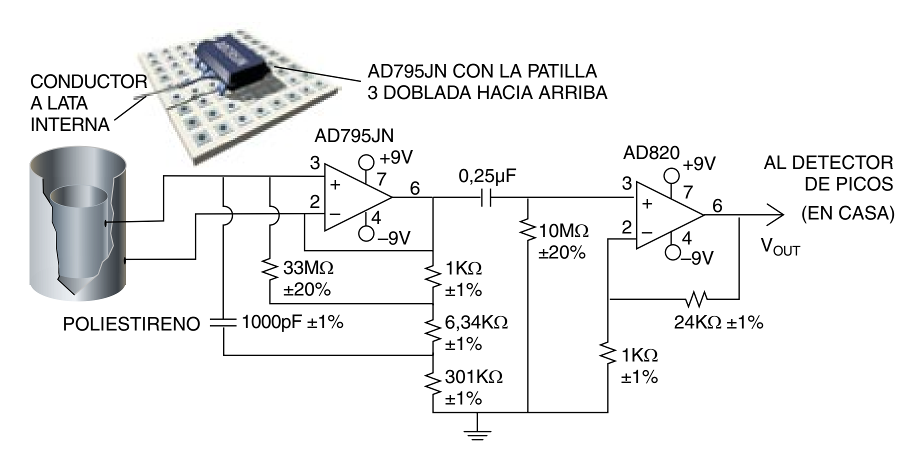
El uso del detector requiere buenos reflejos. Hay que oprimir un instante el botón de puesta a cero y luego apretar el botón de "muestreo". La tensión de salida saltará cuando una gota cargada atraviese el instrumento. Entonces soltaremos enseguida el botón de muestreo para evitar que otra gota posterior arruine la medición. Anotaremos esa tensión del voltímetro. Luego, volveremos a oprimir el botón de puesta a cero, mantendremos apretado el botón de muestreo y esperaremos a la gota siguiente.

Las gotas cargadas suelen dar lecturas del orden de 0,3 volt. Puesto que cargas mayores producen picos de tensión más elevados, la medición de la tensión máxima proporciona una estimación de la carga de la gota:

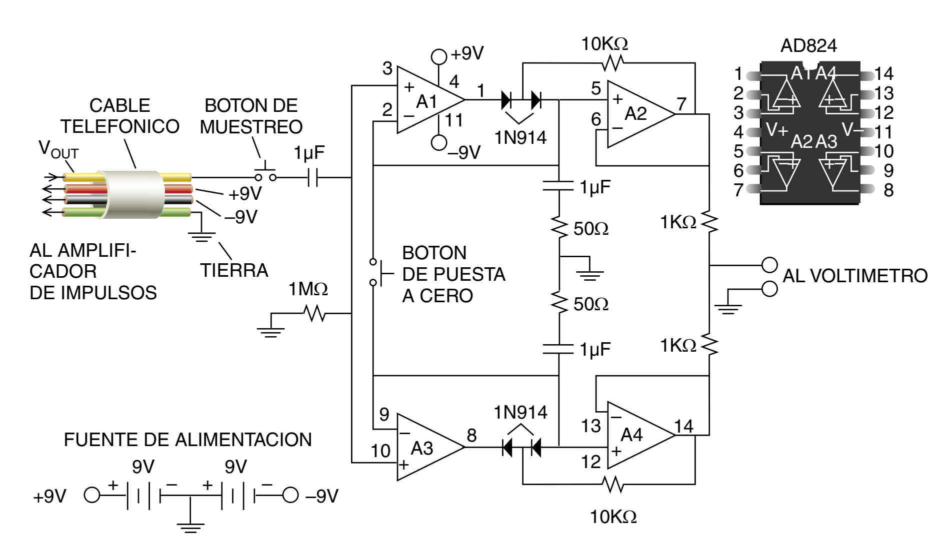
$$\text{Carga} = \frac{K \times V_{max}}{\sqrt{1+(D/L)^2}} \times 10^{-12}\ \text{coulomb}$$

donde $K = 1$ empleando sólo el amplificador de impulsos
$K = 2$ empleando el detector dual de picos
D = diámetro de la lata interna
L = longitud de la lata interna

Para más información acerca de este proyecto, consulte la página World Wide Web de la Society for Amateur Scientists en www.thesphere.com/SAS/.



2. Un amplificador de impulsos genera un pico de tensión al paso de una gota



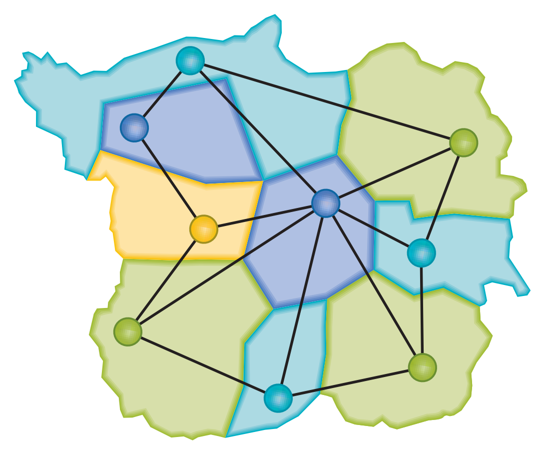
3. Un detector dual de picos de tensión permite realizar mediciones con un voltímetro digital

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Imperios en la Luna

A primera vista, el problema Tierra-Luna no va más allá de un pasatiempo sin consecuencias. La Tierra se ha escindido en naciones distintas e independientes, asentadas cada una en una porción conexa —terrestre o marítima— de la superficie del planeta. Además, cada nación terrícola se ha anexionado una región de la Luna, creando un imperio que consta de dos piezas: una en la Tierra, la otra en su satélite. ¿Cuál es el número mínimo de colores con el que iluminar un mapa tal, de modo que las dos partes de cualquier imperio dado sean del mismo color, sin que haya regiones adyacentes —ni en la Tierra, ni en la Luna— que perteneciendo a imperios distintos sean de colores iguales?



1. Cualquier mapa es representable mediante un "grafo" señalando un nodo en cada país —la capital, por ejemplo— y conectando las ciudades cuyos territorios tengan frontera común. El problema de coloreado exige entonces hallar colores distintos para todo par de ciudades que estén conectadas

El problema, que presenté ya en la sección de junio de 1993, tiene visos de mero artificio. ¿Otro de esos inútiles productos, típicos de los intelectuales encerrados en sus torres de marfil?

De ningún modo. En octubre de 1993, Joan P. Hutchinson, del Colegio Macalester en Saint Paul, Minnesota, publicó en la revista *Mathematics* (vol. 66, n.º 4) un exhaustivo examen de este tipo de cuestiones, titulado "Coloring Ordinary Maps, Maps of Empires, and Maps of the Moon". En una de las secciones de su trabajo, Hutchinson describía una aplicación al ensayo de circuitos impresos, descubierta por investigadores de los Laboratorios AT&T Bell, en Murray Hill, New Jersey. La relación entre una y otra cosas no es nada obvia. Este mes les hablaré de mapas, imperios y grafos; pasadas muchas lunas, echaremos una ojeada a las tarjetas de los circuitos electrónicos.

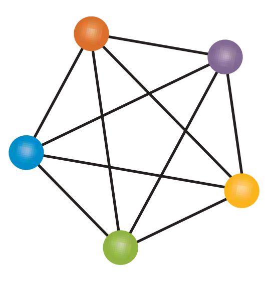
Un mapa es una disposición de regiones, sea en el plano o en otra superficie, como la esfera. Cada región constituye una única parte conexa del plano o la superficie, y las regiones se encuentran en contacto a lo largo de fronteras comunes, que son líneas curvas.

Un grafo es un diagrama formado a partir de cierto número de puntos, llamados nodos o vértices, conectados entre sí por un número de líneas, llamadas lados o aristas. Los grafos son más sencillos y más abstractos que los mapas. Sin embargo, cualquier mapa admite una representación "gráfica", que se obtiene asignando un nodo a cada región y uniendo por lados los pares de nodos, siempre y cuando sus correspondientes regiones compartan un trecho de frontera común.

Imaginemos que los nodos son las capitales de los países y que los lados son autopistas que unen las capitales de países vecinos, atravesando la porción común de sus fronteras. Tenemos entonces el grafo del mapa. El grafo pone de manifiesto qué regiones comparten tramos de frontera, pero suprime los aspectos irrelevantes, como puede ser su forma.

Se dice que un grafo es planar si podemos dibujarlo en el plano sin que haya lados que se corten. Si partimos de un mapa plano, su grafo, obviamente, es planar. Más sorprendente resulta que, para los mapas dibujados sobre la esfera o sobre varios planos o esferas desconectados —como ocurre con los mapas seleno-terrestres—, el correspondiente grafo siga todavía siendo planar en todos los casos. Para ver la razón, imaginemos un mapa dibujado sobre una esfera. Situemos un nodo en cada región y, siempre que dos regiones tengan frontera común, conectemos por nodos los vértices correspondientes. El resultado es un grafo que se puede dibujar sobre una esfera sin que haya lados que se corten.

Pero un grafo tal puede abrirse y desplegarse sobre un plano. A tal fin, imaginemos que en la esfera se taladra un agujerito, que no toca a ninguno de los nodos ni lados del grafo. Supongamos ahora que la esfera está hecha de una fina película elástica. Podemos estirar el agujero, agrandándolo cada vez más. El resto de la esfera se estira y se deforma, arrastrando el gráfico consigo. Estirándolo suficientemente es posible aplanarlo y extenderlo en forma de disco. Depositemos el disco sobre el plano y tendremos dibujado el grafo del mapa sobre un plano, sin lados que se corten.



2. El grafo completo K_5 tiene 5 nodos, cada uno de los cuales está conectado a todos los demás. El grafo, por tanto, exige 5 colores

Si el mapa está dibujado sobre varias esferas, procederemos de igual manera con cada una y depositaremos sobre un mismo plano, sin superponerlos, todos los discos resultantes. El grafo resultante será un grafo desconectado —descompuesto en varias piezas separadas, una para cada

esfera—, pero esa característica es cosa corriente en los grafos.

Un grafo importante es el grafo completo K_n. Tiene n nodos; cada par de nodos distintos está conectado por un lado. Si n es mayor o igual que 5, el grafo K_n no es planar.

Se dice que un mapa —en el plano, en una esfera, en varias esferas o en la superficie que sea— es k-coloreable si podemos colorear sus regiones con no más de k colores, de modo que las áreas que compartan un tramo de frontera reciban colores distintos. (Las regiones que sólo se toquen en un punto, o en un número finito de puntos, pueden recibir, si es necesario, el mismo color.) La correspondiente propiedad para grafos se desarrolla en líneas muy parecidas. Un grafo es k-coloreable si podemos colorear sus nodos, sin usar más de k colores, de manera que los nodos conectados por lados reciban distinto color.

No hay dificultad en ver que un mapa es k-coloreable si y solamente si su grafo asociado es k-coloreable. Basta colorear cada capital —cada nodo del grafo— con el color del país correspondiente. El mínimo valor de k que permite colorear el grafo recibe el nombre de número cromático del grafo. Nos dice el mínimo de colores necesarios para ese grafo; y, por tanto, también para el mapa correspondiente. Evidentemente, el número cromático de K_n es n, porque cada nodo está conectado con todos los demás, lo que impide que dos nodos puedan ser del mismo color.

Un problema relacionado de cerca con el de los mapas Tierra-Luna fue propuesto por Percy John Heawood en 1890. El escenario se reduce a la Tierra, pero ahora cada país forma parte de un imperio compuesto, como máximo, por m países, debiendo emplearse el mismo color para todos los países de un mismo imperio, aunque distinto del de las regiones adyacentes. (Se sobreentiende que los países de un mismo imperio no se tocan, salvo en un número finito de puntos.) Un mapa tal se denomina un m-perio. Heawood demostró que un m-perio puede en todos los casos colorearse con $6m$ colores, para todo m mayor o igual que dos, independientemente del número de imperios que haya.

Dado que los m-perios son mapas de un tipo particular, a cada uno puede serle asociado un grafo con un nodo por país. Sin embargo, deja de ser verdadero que cada coloreado legítimo del grafo esté en correspondencia con un coloreado del imperio. El motivo es que las reglas de coloreado de grafos no implican necesariamente que los nodos del mismo imperio reciban el mismo color. Esta situación es difícil de manejar mediante el grafo del mapa. Lo que se hace, en cambio, es modificar la construcción del grafo, de manera que las reglas de coloreado resulten, automáticamente, correctas.

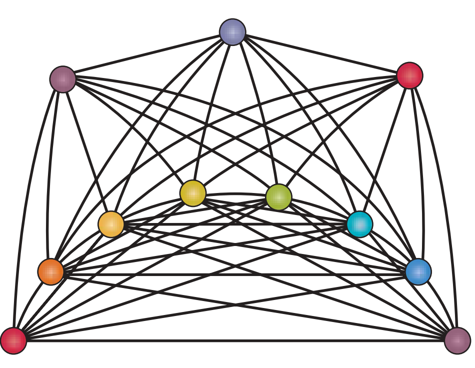
He aquí cómo. El grafo m-périco asociado a un mapa m-perial dado tiene sólo un nodo para cada imperio, en lugar de uno por región. Si no lo ve muy claro, imagine que el nodo representa al emperador. Dos nodos están unidos por un lado si y solamente si los imperios correspondientes cuentan, al menos, con un par de países adyacentes. El grafo de un m-perio podría concebirse como el "grafo de invasión" de emperadores que pueden entrar en guerra a través de una frontera común: un nodo por emperador, un lado por cada posible conflicto bilateral.

Desde el punto de vista conceptual, el grafo del m-perio se obtiene a partir del grafo ordinario por identificación de todos los nodos de un imperio dado; es decir, dibujándolos todos en uno y un mismo lugar. Esta construcción genera con frecuencia lados repetidos; los lados superfluos se eliminan, dejando sólo uno. La identificación de todos los nodos de un imperio dado les impone automáticamente a todos el mismo color, así que el número de colores necesarios para un m-perio es el mismo que el número cromático de su grafo m-perial.

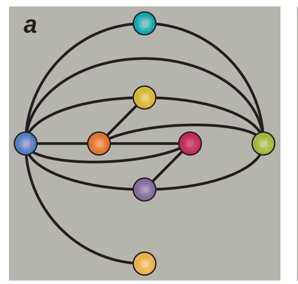
En 1983, Bradley W. Jackson y Gerhard Ringel se valieron de este método para demostrar que el número $6m$ del teorema de Heawood no podía ser disminuido. Lo consiguieron demostrando que se puede hallar un m-perio cuyo grafo m-perial es el grafo completo K_{6m}. Dado que K_{6m} necesita $6m$ colores, existe un m-perio que no puede colorearse con menos de $6m$ colores.

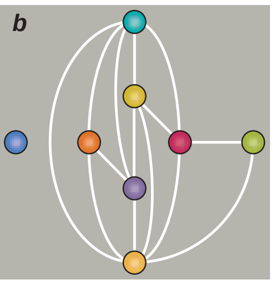
Podemos asociar un mapa seleno-terrestre a un tipo particular de bi-perio, aunque con una geometría subyacente ligeramente peculiar —dos esferas— que escinde todos los bi-perios en dos piezas. Su grafo consta de dos grafos planares disjuntos; en la figura 4 vemos una disposición posible. (La forma redondeada nada tiene que ver con la Tierra o la Luna: es por facilidad de dibujo.)

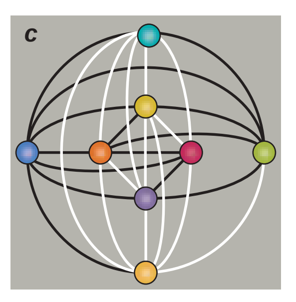
Supongamos que este grafo Tierra-Luna representa el grafo de un bi-perio, con lo que los nodos pertenecientes al mismo imperio se identifican, creando el último grafo de la figura. Vemos que el grafo resultante no tiene ya por qué ser planar; éste, de hecho, no lo es. El grafo es, sin embargo, casi planar. La forma en que está construido muestra que sus lados pueden separarse en dos subconjuntos, cada uno de los cuales forma un grafo planar sobre el conjunto de nodos original. Los dos subconjuntos son,



3. El grafo de Rolf Sulanke, de espesor dos, exige nueve colores. Su parte inferior consta del grafo completo K_8







4. El grafo Tierra-Luna correspondiente a ocho imperios tiene dos piezas desconectadas (a y b) *que son planares (carecen de lados secantes). El bi-perio correspondiente* (c) *se crea por superposición de los nodos pertenecientes al mismo imperio. Esta figura es en realidad el grafo completo K_8 y exige 8 colores*

sencillamente, los lados de los dos grafos precedentes.

Dícese de tales grafos que tienen espesor dos. En general, un grafo tiene espesor t si sus lados pueden ser separados en t subconjuntos, y no en menos, de modo tal que cada subconjunto constituye un grafo planar.

Cada mapa terreno-lunar está formado por dos mapas planares —uno de la Luna, otro de la Tierra— y tiene un espesor de dos. Recíprocamente, todo grafo de espesor 2 corresponde a un mapa Tierra-Luna (aunque puede haber regiones no reclamadas por ninguno de los imperios).

Dado que un grafo Tierra-Luna es un tipo especial de grafo bi-perio, el teorema de Heawood implica que 12 colores bastan para cualquier mapa Tierra-Luna. Pero no podemos concluir que 12 colores sean también necesarios. La razón es que no todo bi-perio corresponde a un mapa Tierra-Luna: algunos imperios de un bi-perio podrían tener sus dos territorios en la Tierra.

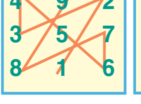
De hecho, no es posible convertir ninguno de los grafos bi-perios conocidos que realmente exigen 12 colores en un mapa Tierra-Luna. Cabe la posibilidad, por tanto, de que un número menor que 12 colores fuera siempre suficiente para un grafo Tierra-Luna. Por ejemplo, los grafos completos K_9, K_{10}, K_{11} y K_{12} son todos ellos grafos bi-perios, pero tienen espesor 3, y no pueden, por tanto, ser grafos Tierra-Luna. El espesor de Kn es tres si $n = 9$ o 10, y es, en los demás casos, el máximo entero menor o igual que $(n + 7)/6$.

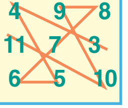
El último grafo de la ilustración (*c*) es el grafo completo K_8, por lo que K_8 tiene espesor dos. Significa esto que puede representarse como grafo Tierra-Luna: lo que demuestra que en el problema son necesarios al menos ocho colores en el problema Tierra-Luna. Rolf Sulanke, de la Universidad Humboldt de Berlín, ha elevado este límite inferior a nueve, demostrando que el grafo mostrado en la figura 3 tiene un espesor de dos y un número cromático de 9. La cuestión del problema Tierra-Luna no tiene todavía respuesta definitiva: es 9, 10, 11 o 12.

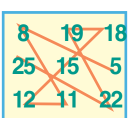
Quizá quiera el lector considerar mapas Tierra-Luna-Marte, en los que cada emperador tiene tres territorios, uno en cada mundo. Estos mapas, casos particulares de mapas tri-periales, presentan grafos tri-perios de espesor 3. Los problemas de coloreado de mapas de este tipo, aunque muy entretenidos, apenas hallan aplicaciones prácticas. Veremos el próximo mes, sin embargo, que la noción de espesor sí tiene utilidad en el ensayo y verificación de circuitos electrónicos.

Acuse de recibo

La sección de marzo sobre cuadrados alfamágicos trajo de vuelta cierto número de aperitivos matemáticos, deliciosos e intrigantes. Delia T. Lewit, de Huntington Park, California, ha observado una curiosa regularidad en todos los ejemplos de cuadrados mágicos de 3 × 3. Al conectar los números en orden creciente, en todos ellos aparece una misma figura poligonal. ¿Habrá quien explique si siempre será así en todo cuadrado mágico de 3 × 3, o que infirme la conjetura?



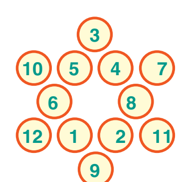




Una pauta curiosa que aparece en los cuadrados mágicos de 3 × 3

Me ha escrito Lee Sallows desde Nimega, en Holanda, haciéndome saber sus últimas reflexiones sobre cuadrados mágicos. Mencionó también el problema —un auténtico reto— planteado por Martin Gardner en 1996 en la revista *Quantum*: construir un cuadrado mágico de 3 × 3 compuesto por nueve cuadrados perfectos, o demostrar que es imposible. La tentativa más conocida hasta el momento parece ser cuasi-acierto, con un total mágico de 1472 —que es también un cuadrado perfecto— en todas las filas, todas las columnas y en una de las diagonales principales (pero no la otra). Y Julius Telesin, de la Universidad Ben-Gurion, en Israel, ha enviado un fascinante análisis de los “David-mágicos”. En el que se muestra, cada línea recta de cuatro números tiene suma 26.

127^2	46^2	58^2
2^2	113^2	94^2
74^2	82^2	97^2



Cuasiacierto de un cuadrado mágico (arriba) *y un David-mágico* (derecha)

Obra maestra

Compendiada

ENCYCLOPEDIA OF MOLECULAR BIOLOGY AND MOLECULAR MEDICINE. Dirigido por Robert A. Meyers, WCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1996.

Sin duda, la *Enciclopedia de Biología y Medicina Moleculares* es una obra de consulta y referencia. El propósito esencial de la misma es canalizar mediante una sola fuente bibliográfica el acceso a multitud de temas, conceptos y tópicos básicos que configuran las bases moleculares de la vida, con un énfasis premeditado sobre la medicina molecular, la exploración genética y el diagnóstico y terapia génicos. De hecho, cerca del noventa por ciento de las contribuciones a la serie versa sobre temas de genética humana, incluyendo los últimos avances producidos dentro del proyecto del genoma humano. Asimismo, la biología molecular ostenta un papel preponderante, abarcando aspectos relevantes de los genomas de plantas y animales más estudiados y representativos, sin olvidar el avance biotecnológico, la estructura molecular, interacciones y análisis de proteínas, de los hidratos de carbono y de los lípidos.

Los temas de investigación más novedosos tienen también cabida en la serie, destacando entre ellos la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), la evolución de la inteligencia genética, los rasgos genómicos, la influencia de las mutaciones genéticas en el proceso de envejecimiento, el plegamiento de las proteínas, la transducción de señal, la transgenia y técnicas de transferencia genética, así como las bases moleculares de enfermedades graves, como el síndrome de la inmunodeficiencia adquirida o la fibrosis cística y aspectos relacionados (oncogenes y genes supresores de tumores).

Las contribuciones a la serie se hallan distribuidas en once áreas temáticas que van de los *ácidos nucleicos* hasta la *biología molecular* y la *biotecnología*. Hay un ordenamiento de sus artículos por categorías. En primer lugar, el nivel central o básico con las contribuciones relacionadas con cuestiones fundamentales. Una segunda categoría, definida como satélite de la básica, que engloba artículos donde se describen perspectivas determinadas sobre áreas relevantes de investigación. Y, finalmente, la categoría relativa a tratamientos concretos de asuntos específicos como, por ejemplo, el cáncer. La enciclopedia tiene también en cuenta las referencias cruzadas entre artículos afines, incorporando además una compilación de palabras-clave y un glosario de términos básicos.

El riesgo de una calidad desigual, común en las obras de multiautor, ha sido soslayado en la enciclopedia mediante la imposición de criterios de uniformidad en la elaboración de los artículos. Así, todos se inician con un índice de las entradas que contienen, seguido de un listado de palabras-clave con su correspondiente descripción. A continuación, aparece el texto propiamente dicho de las contribuciones, cuyos párrafos iniciales se dedican a introducir el tema tratado y su significación. Todos los artículos presentan al final una bibliografía complementaria, amén de la enumeración cruzada de artículos relacionados dentro de la obra.

La enciclopedia no puede considerarse, ni parece pretenderlo, un libro de texto al uso. El propósito es otro. Los volúmenes de que consta la serie pretenden facilitar la comprensión de temas o nociones en la carencia de un conocimiento previo. En una época en la que el progreso científico en biología molecular es vertiginoso, no es posible mantenerse globalmente al día de las nuevas ideas o conceptos a los que aquél da lugar. Con frecuencia los investigadores deben abordar nuevas metodologías e introducirse en temas ajenos a su ámbito de experiencia. En dichas circunstancias, resulta frustrante y enormemente laborioso el proceso de búsqueda bibliográfica, su selección y su estudio. Esta enciclopedia puede aportar una ayuda inapreciable en dicha tesitura al presentar de una manera concisa y atrayente la información adicional requerida.

LLUIS CORNUDELLA

Ecología

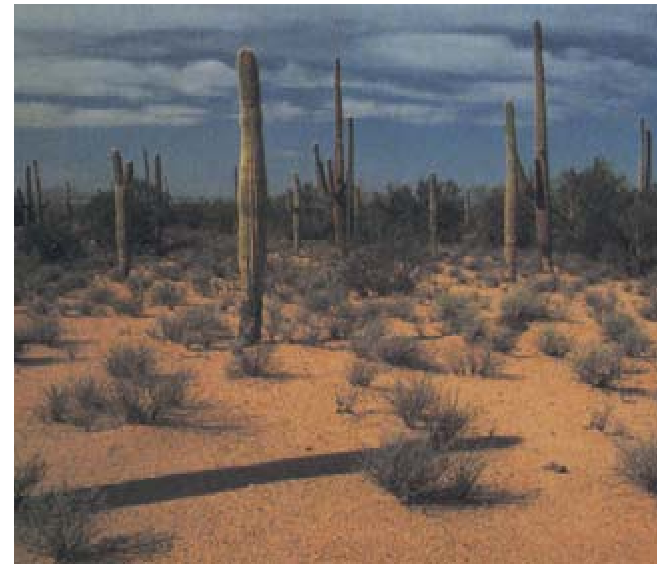
Interrelaciones

FIRST ECOLOGY, por Alan Beeby y Anne-Maria Brennan. Chapman and Hall; Londres, 1997. **CONCEPTS OF ECOLOGY**, por Edward J. Kormondy. Prentice Hall; New Jersey, 1996.

OUR BIOSPHERE, por Ramón Margalef. Ecology Institute; Oldendorf / Luhe, 1997. **VEGETATION PROCESSES IN THE PELAGIC: A MODEL FOR ECOSYSTEM THEORY**, por Colin S. Reynolds. Ecology Institute; Oldendorf / Luhe, 1997.

CHEMICAL ECOLOGY. THE CHEMISTRY OF BIOTIC INTERACTION. Dirigido por Thomas Eisner y Jerrold Meinwald. National Academy of Sciences; Washington, 1995. **EVOLUTIONARY ECOLOGY ACROSS THREE TROPHIC LEVELS. GOLDENRODS, GALLMAKERS, AND NATURAL ENEMIES**, por Warren G. Abrahamson y Arthur E. Weis. Princeton University Press; Princeton, 1997. **ECOSYSTEM GEOGRAPHY** por Robert G. Bailey. Springer-Verlag; Nueva York, 1996.

Quiere la hagiografía de G. E. Hutchinson que la ciencia ecológica naciera de la inspiración que éste tuvo en la gruta italiana de Santa Rosalía, mientras observaba dos especies de *Corixa*: *C. punctata y C. affinis*. Creyó él que la primera, representada por la hembra, se encontraba al final de su ciclo reproductor, mientras que la segunda, de la que vio los dos sexos, lo iniciaba. Con tan escuálidos mimbres ensartó las cadenas alimentarias, diversidad y nicho ecológico. Cierto es que las ideas no eran nuevas en 1957, cuando ocurrieron los hechos, pero sí fue toda una innovación la síntesis de las mismas centrada en la diversidad. Aunque esta tesis pervive cuarenta años después, seguimos sin encontrar pruebas convincentes de la vinculación causal entre diversidad de las especies y función de los ecosistemas. Situación que nos invita a echar una vistazo sobre el estado real de la ecología. Con ese fin hemos escogido tres tipos de obras,


Desierto


Taiga


Tundra


Ecosistema alpino

que, arrancando de una introducción generalísima, nos llevarán a distintos ámbitos de aplicación de los conceptos fundamentales, tras pasar éstos por el cedazo crítico de Ramón Margalef y Colin S. Reynolds.

First Ecology, el punto de partida, es un compendio de biología general expuesta *sub specie oecologiae*. Aquí, estructuras y procesos se consideran a la luz de la interrelación entre lo vivo e inerte. Tomemos por muestra la noción de nicho, introducida al hablar de la adaptación de las especies. De cualquier factor ambiental, razonan los autores, hay un intervalo de valores en cuyo ámbito la población se desenvuelve con soltura. La persistencia y distribución de una especie depende de esa adaptación al entorno y de los efectos combinados de las presiones selectivas que sufra.

El sumatorio de factores a los que se adapta el grupo constituye el nicho ecológico. Y los valores de cada factor que encajan con el desenvolvimiento de la población integran el rango del nicho. (La idea de nicho no remite, en puridad, a un espacio, sino que muestra cómo vive una especie.) De esos factores importan, sobre todo, los recursos. Las especies capaces de explotar un rango amplio de recursos se llaman generalistas y, especialistas, las que sólo encajan en nichos de recursos muy restringidos.

Con una estructura más al uso en los manuales, con mayor hondura también, ha llegado a su cuarta edición el texto, remozado, de Kormondy, catecismo y vademécum de los biólogos de los últimos treinta años. Aquí el hilván es el enfoque de Eugene Odum, quien define la ecología como "el estudio de la estructura y función de los ecosistemas". *Concepts of Ecology* gira en torno a tales sistemas.

Todo sistema consta de dos o más componentes que interactúan entre sí en un espacio con el que pueden o no relacionarse. En los ecosistemas distinguimos una componente biológica que se complementa con otra inerte. La componente abiótica entraña un rimero de moléculas y gradientes. Calcio, oxígeno, agua y dióxido de carbono, carbonatos y fosfatos, amén de subproductos de la actividad orgánica, ejemplifican el dominio de las moléculas; se presentan en gradiente la humedad y temperatura.

La interrelación entre las componentes del ecosistema tiene una expresión energética. La energía ra-

diante, en forma de luz solar, es la fuente que alimenta la fotosíntesis, función que compete a los organismos productores. Pertenecen a esta categoría las algas de un estanque, las hierbas de un campo, los árboles de un bosque; es decir, plantas con clorofila. Productoras son también las bacterias fotosintetizadoras y las quimiosintetizadoras; estas últimas obtienen energía a través de la oxidación de compuestos orgánicos. Puesto que la energía incorporada en el productor a través de la fotosíntesis se sintetiza luego en moléculas que sirven para satisfacer su metabolismo y desarrollo, del individuo en cuestión decimos que es autótrofo. Un consumidor primario, un herbívoro, es un heterótrofo que extrae su alimento de las plantas. El consumidor secundario, un carnívoro, es un heterótrofo que extrae su nutrición indirectamente del productor a través del herbívoro.

Existe un grupo adicional de heterótrofos que desempeña una misión crítica en los ecosistemas: los descomponedores o reductores. Formado sobre todo por hongos y bacterias, el grupo de los descomponedores no ingieren alimento, lo absorben. Producen enzimas que liberan sobre el material vegetal o animal muerto; entonces absorben algunos de los productos degradados y digeridos. En general, en los ecosistemas terrestres las bacterias actúan sobre los tejidos animales y los hongos actúan sobre los tejidos vegetales. Los minerales resultantes de la descomposición orgánica prosiguen su circulación por el ecosistema.

Flujo unidireccional de energía, pues, y ciclo de los minerales. Pero de los ecosistemas conviene, además, resaltar otros dos atributos: las magnitudes espaciotemporales y la interrelación con otros. Los ecosistemas abarcan un espacio y existen en el tiempo; tienen profundidad, anchura y altura, más un pasado, un presente y un futuro. Y si ningún organismo puede valerse por sí mismo, tampoco puede hacerlo un ecosistema. Un estanque está rodeado por una ribera de la que recibe materia orgánica o está vinculado a otro curso de agua que le aporta nutrientes. Ello nos muestra que los ecosistemas son sistemas abiertos. Pero también son autorreguladores, en los que opera una doble retroalimentación, positiva y negativa.

Por depender del tiempo, los ecosistemas están sometidos a cambios en sus componentes. El alga de agua dulce *Cladophora* segrega carbonato cálcico como subproducto de su metabolismo general. Andando el tiempo, el carbonato cálcico modifica la química del agua y del sustrato, hasta el punto de que resulta imposible allí la vida para el alga; puede, sin embargo, colonizarlo otra especie. Se dice entonces que la modificación experimentada en la química del agua ha sido un factor limitante.

La idea de factor limitante se atribuye al químico alemán del siglo pasado Justus von Liebig, quien, a propósito de las cosechas, afirmó que "la producción de un campo sube o baja en proporción exacta a la subida o caída de minerales aportados en la naturaleza". En particular, estableció la importancia agrícola del fósforo: si escaseaba, la cosecha era pobre y, si faltaba, ni siquiera crecían los sembrados.

Entre los teóricos de la ecología felizmente vivos que más han aportado a la fundamentación y vertebración de la disciplina destaca Ramón Margalef. En *Our Biosphere* vuelve a plantearse, una vez más, las bases de la ecología y sus principios unificadores. Desde sus primeros trabajos en 1943, Margalef se ha esforzado siempre por conjugar el trabajo de campo y laboratorio ("Sustancias químicas como determinantes de los fenómenos sexuales en los *Chlamydomonas*") con las cuestiones normativas o de carácter universal ("El Plancton de agua dulce. Consideraciones relativas a su origen de interés biológico general"). Aunque se confiesa naturalista a la vieja usanza, halla en la física —termodinámica de los procesos irreversibles, dinámica de fluidos— y en la teoría de la información el hontanar de sus ideas, siempre por él cuestionadas y casi siempre resueltas en la misma dirección, pese a cambios de postura más o menos coyunturales, como su aceptación tardía de la importancia de la noción de biodiversidad.

Para Margalef, la propiedad principal de los sistemas vivos estriba en su capacidad de almacenar y copiar información, adquisición que procede a lo largo del tiempo, sin posibilidad de volver hacia atrás. Añade una nota derivada cuya denominación, de raigambre aristotélica, se la ha sugerido, sin embargo, el título de un famosos libro de H. Maturana y F. J. Varela, la autopoyesis, es decir, la capacidad de autoorganización que evidencian los sistemas. Para esa autoestructuración, los sistemas necesitan del espacio, una magnitud de cuyo olvido en el desarrollo de la ecología él culpa a los modelos matemáticos de Lotka y Volterra.

En busca de un concepto motriz, unificador, reflexiona por extenso sobre dominios de la ecología que le parecen especialmente significativos: el fitoplancton (producción primaria en el agua), el bosque (producción primaria en tierra), la sucesión y la diversidad. Fitoplancton es el nombre dado a la reunión de microorganismos fotoautotróficos que desarrollan los estadios principales de su ciclo de vida en aguas abiertas, o zona pelágica, del mar, lagos, estanques y ríos. El fitoplancton se desarrolla en una capa muy estrecha e inmediata a la superficie. La mayor producción acontece donde se combinan valores moderados o bajos de luz y nutrientes con profundidades intermedias (de 30 a 80 m), y donde a menudo se solapan bruscos gradientes de temperatura y densidad (termoclinas) y de nutrientes (nutriclinas). (Margalef atribuye al fósoforo un papel capital.)

En busca de un criterio normativo, resalta las analogías del bosque con el fitoplancton, para poner de relieve que la evolución ha procedido de una manera igualmente eficaz y equivalente en ambos ecosistemas. Plancton y bosque nos enseñan los rasgos esenciales del funcionamiento de los ecosistemas en general y, en particular, su dependencia de energía externa. Y ello pese a las notables diferencias entre uno y otro ecosistema; por dar una: en el fitoplancton no existen organismos pluricelulares estrictamente hablando. Para Margalef, el desarrollo del ecosistema implica un cambio fundamental en el reparto de energía entre producción (P) y respiración (R), con P mayor o menor que R en los estadios iniciales y $P = R$ en el clímax.

La visión que Margalef tiene de la ecología es darwinista. En ese horizonte, no puede entenderse la sucesión sin asociarla a la evolución. El marco de la sucesión de las comunidades es como una *vis a tergo* o banda transportadora que impulsa la evolución de todas las especies involucradas. Ahora bien, los cambios operados en los sistemas vivos son irreversibles y los episodios de cambio, asimétricos. En la vida, la asimetría aparece desde el comienzo, desde el nivel elemental de los ciclos metabólicos fundamentales y, de forma señalada, en el contraste entre el nacimiento y la muerte. Se extiende hasta los cambios visibles en el macronivel del ecosistema, pasando a través de la clase de relaciones que se consideran en los modelos que afectan a un depredador y una presa y muestran presiones selectivas







Utetheisa ornatrix *(*en reposo a la izquierda y en fase larvaria en el centro*) emite una espuma que ahuyenta a sus posibles depredadores*

comunes en la evolución de ambos. En resumen: el éxito en evolución podría depender de anticipación, de ser un poco más adaptado al futuro que al presente.

Venciendo antiguas reticencias se muestra ahora convencido de que diversidad (o ecodiversidad) y biodiversidad son conceptos complementarios y mutuamente necesarios, hasta el punto de que, considerados por separado, cada uno pierde mucho de su significado potencial. La biodiversidad nos remite al reservorio de genotipos (la riqueza real del diccionario de la naturaleza) y complementa el concepto de diversidad, que se ocupa en general del estudio de ecosistemas donde opera la evolución. La diversidad funcional de los ecosistemas procesa el material genético a partir de la reserva local de biodiversidad disponible y este material, modificado o no, vuelve a la alacena de biodiversidad. En el mar, cerca del límite inferior de la zona fótica, próxima a la nutriclina, existe una gran reserva de biodiversidad que puede compararse con los bancos de semillas en los bosques.

Más proclive al formalismo matemático, Colin S. Reynolds, que ha puesto en vereda axiomática ideas dispersas del fitoplancton, perfila su esbozo unificador en *Vegetation Processes in the Pelagic: A Model for Ecosystem Theory*, donde explica los procesos de vegetación a partir de las observaciones de lo que ocurre en sistemas pelágicos.

Aunque los individuos componentes del fitoplancton pertenecen a especies de algas, bacterias e incluso organismos animales, los tres grupos que suelen considerarse más representativos de ese ecosistema son las diatomeas (Bacillariophyceae), los dinoflagelados (Pyrrhophyta) y los cocolitofóridos (Haptophyceae). En general, las diatomeas predominan en aguas frías y ricas en nutrientes asociadas con altas latitudes, circulaciones de baja latitud y afloramientos de agua circumpolar; en el otro extremo, los cocolitofóridos abundan en el fitoplancton de aguas cálidas y oligotróficas de los océanos Atlántico, Indico y Pacífico. Numerosas especies de dinoflagelados (*Ceratium*, *Dinophysis*, *Peridinium* y *Prorocentrum*) caracterizan entornos intermedios.

Los sistemas planctónicos operan a pequeñas escalas temporales. Las especies que lo componen son, a su vez, microscópicas; sus dimensiones lineales abarcan cuatro órdenes de magnitud, entre 0,2 micrometros y 2 mm. En su adaptación al medio recurren a estrategias que se adivinan en los prados o en los doseles de la pluviselva. No son otras que optar por construir poblaciones rápidamente mediante la inversión en la tasa de crecimiento (selección de la estrategia de la *r*) o por ser más refinados y especializados a la hora de buscar y mantener los recursos limitantes (selección de la *K*).

Las interacciones entre la entrada de energía mecánica y su disipación a través de vórtices turbulentos fundan el desenvolvimiento del fitoplancton. Las plantas no necesitan allí tejido mecánico, ya que su talla es inferior a los vórtices turbulentos; quedan, pues, incluidas en la estructura pelágica para su transporte y exposición a la luz, dióxido de carbono y nutrientes. En la captación suficiente de cada uno de esos factores les va la supervivencia.

Los organismos no se mueven sólo por la vista y el oído. Unos crean señales químicas, atendidas por otros. El resultado es un inmensa interrelación, fundamental para el mantenimiento de la vida. Los individuos sintetizan y segregan moléculas para atraerse a su pareja, asociarse con los simbiontes, disuadir a los enemigos y ahuyentar a los patógenos. Sobre ese dominio entiende la ecología química, cuyo espectacular avance, gracias al refinamiento del análisis y al progreso de la biología, se refleja en *Chemical Ecology. The Chemistry of Biotic Interaction*.

Las moléculas que desempeñan un papel prominente en las interacciones no suelen coincidir con las sustancias que el organismo emplea en su propio mantenimiento rutinario, verbigracia, en la respiración, la digestión, la excreción o la fotosíntesis. Antes bien, se trata de metabolitos secundarios que derivan de otros que sí participan en los procesos fisiológicos primarios. Hay más diferencias entre unos y otros. Los metabolitos primarios son constituyentes universales de células, tejidos y órganos, en tanto que los secundarios presentan una distribución idiosincrásica, exclusivos de determinado número de especies o de un puñado de familias.

Los compuestos secundarios cumplen muchas veces funciones de defensa; sobre todo, en organismos de vida libre con una capacidad de movimiento limitada, en tanto que escasean en los grandes vertebrados, que ocupan una posición culminante en la red trófica. Para redoblar la defensa, el organismo segrega sustancias tóxicas. Pensemos, a título de ejemplo, en el amplio repertorio de agentes nocivos que guardan los anfibios en las glándulas granulares de la epidermis.

Un factor que ha contribuido al éxito de los insectos en la colo-

nización de la tierra estriba en su extraordinaria versatilidad química. Se pondera su exosqueleto, que los protege de la desecación, su metamorfosis, que les permite explorar nuevos nichos, su desarrollo alar, para una más amplia dispersión. Pero no se insiste suficientemente en la ancha gama de moléculas que producen para los procesos más dispares: venenos para matar la presa, repelentes e irritantes para ahuyentar a los enemigos y feromonas para la comunicación sexual.

En la naturaleza, la química de la defensa ha evolucionado en paralelo con la química del acecho, la alarma y el engaño. No es insólito que una especie de artrópodo se dedique a la caza de otra para su propia alimentación o la de su progenie. El éxito acostumbra depender de señales químicas que les orientan en la búsqueda y elección de sus víctimas, incluso con ayuda de terceros afectados, como en el caso de las plantas atacadas por larvas. Por otro lado, en la atracción sexual de una pareja interviene toda una cascada de metabolitos y reacciones de la vía de biosíntesis de feromonas.

Una interrelación que reviste especial significación en ecología es la que se produce en el parasitismo. Y, dentro de éste, la formación de agallas, cecidios o domacios. Estas hipertrofias o neoformaciones del tejido vegetal surgen en respuesta a la acción parasitaria. Las agallas suministran alimento y refugio a las larvas depositadas; a diferencia de los tumores y otros amasijos celulares, se trata de estructuras muy especializadas. En *Evolutionary Ecology across Three Trophic Levels. Goldenrods, Gallmakers, and Natural Enemies* Warren Abrahamson y Arthur Weis presentan los resultados de un cuarto de siglo de investigación dedicada a las interacciones entre el huésped vegetal, el insecto que lo parasita y la cohorte de artrópodos y aves que son los enemigos naturales del parásito. La planta pertenece al género *Solidago* y el galígeno parasitario del tallo es un díptero (*Eurosta solidaginis*). El sistema investigado aporta un modelo que puede someterse a manipulaciones experimentales (químicas, genéticas y etológicas) con las que someter a prueba teorías y conceptos recibidos.

El éxito reproductor de un galígeno depende de la correcta ejecución de muchos procesos secuenciales, que van desde la elección del huésped hasta la maduración de la larva, pasando por la oviposición e inducción de la agalla. Por su parte, la planta puede facilitar o bloquear la acción del galígeno. A esa relación entre el huésped y la larva parasitaria debe agregarse la intervención de los enemigos naturales del galígeno, por lo común avispas parasitoides. Con suma frecuencia, las avispas hurgan con sus aciculados ovipositores el tejido de la agalla, hasta llegar a la cámara central, donde dejan un huevo sobre el galígeno. Cuando el huevo eclosiona, la larva de avispa se come el galígeno, pupa y emerge, adulto, listo para iniciar un nuevo ciclo. Además de los parasitoides, las aves insectívoras, como los picamaderos, picotean hasta abrir las agallas para extraer los galígenos.

Complementaria de esa visión particularizada es la perspectiva de conjunto que, en su vertiente práctica, atiende la gestión de los ecosistemas. Es lo que se hace en *Ecosystem Geography*. Su autor, director de proyectos del Servicio Forestal de Estados Unidos, ha destilado en esta obra más de dos décadas de investigación cartográfica.

La geografía de los ecosistemas estudia su distribución y estructura. Al no ser los ecosistemas entidades cerradas, sino hallarse vinculadas con los circundantes, la alteración sufrida por un sistema redunda en la modificación de los que le rodean. El problema estriba en hallar un criterio aceptado de integración que abarque elementos bióticos e inertes. No es nuevo del todo ese empeño. En el siglo XVIII, von Humboldt aportó ya un esbozo de zonalidad latitudinal y altitudinal de la fauna y la flora.

La geografía incluye unos sistemas en otros, admitido que los contornos están abiertos al intercambio de materia y energía. En las zonas de contacto, por ejemplo en el límite entre el bosque y el prado, se produce una mayor densidad de población que en un espacio boscoso o en una pradera; las pesquerías anádromas o las plagas trascienden fronteras más o menos artificiales. Ello hace obligado el análisis de multiescala en que se mueve la geografía de los ecosistemas. Toda escala exige cierto nivel de detalle. Los microecosistemas (de pocas hectáreas), o locales, se agrupan en mosaicos del espacio, que se extienden entre 10 kilómetros cuadrados hasta varios miles de kilómetros cuadrados. Un espacio de montaña constituye un ejemplo clásico de mosaico.

LUIS ALONSO

Catecismo matemático

De la A a la Z

MATHEMATIK VON *A* BIS *Z*, por William Dunham. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1996.

Aunque este libro, subtitulado “un viaje alfabético a través de cuatro milenios”, está dirigido a quienes poseen algún bagaje matemático, resulta accesible para personas casi sin formación y no es aburrido para los profesionales. William Dunham, experto en divulgación de la matemática, ha conseguido con éste un muy buen libro. En él están presentes varios géneros literarios. Por una parte es una historia de los matemáticos, con numerosos y bien seleccionados datos biográficos de Newton, Leibniz, Fermat, Russel y otros. Presenta, apoyado en citas escogidas, la exposición de sus puntos de vista científicos y un estudio de la evolución de sus ideas.

Constituye también una historia de los conceptos matemáticos, desde sus remotos orígenes hasta la actualidad inmediata (contiene, por ejemplo, referencias a la prueba de Wiles de la conjetura de Fermat). Y es, sobre todo, un libro de matemáticas, que llega, partiendo de muy pocos conocimientos básicos, hasta algunas cuestiones matemáticas profundas, de modo elemental, comprensible y ameno.

Hay en el libro un aparente desorden, ya que en una primera lectura parece que la selección de los temas se debe al capricho del autor de dedicar cada capítulo a un tema cuyo nombre comienza con una letra del alfabeto de la *A* a la *Z*, pero el autor se permite licencias, como hacer empezar Newton por *K* llamándole rey de las matemáticas, que dotan al libro de una lógica interna gracias a la cual puede utilizar en cada capítulo los resultados desarrollados en los anteriores. También es a veces caprichosa la selección de los temas y los personajes, pero ésta es una cualidad más de la obra que no pretende convertirse en una obra exhaustiva ni de matemáticas ni de historia.

La *A* del primer capítulo se asigna a la aritmética. En él se introducen los números primos y se estudian algunos resultados ciertos y algunas conjeturas falsas conectadas con los enteros. Una buena parte del capítulo está dedicada a los “primos de Mersenne”, es decir, a los números

de la forma $2p-1$ con p número primo. Para $p = 11$ se obtiene el primer número de Mersenne compuesto que es el 2047. Sin embargo, omite la prueba de la existencia de una infinidad de números de Mersenne que son compuestos, realizada por A. Granville. El capítulo, que contiene unas deliciosas referencias finales a la vida y obra de Erdös, halla su extensión natural en el capítulo *P*, dedicado a los números primos, más precisamente a comentar el célebre "teorema de los números primos", que establece que el cociente entre el número de números primos menores que un número x y dicho número es del orden de $1/\ln x$ (naturalmente hay un capítulo anterior dedicado a los logaritmos). No prueba el teorema, pero convence al más escéptico de la validez del mismo.

La *B* de Bernoulli sirve de excusa para una excursión por la teoría de probabilidades y por las cuatro generaciones de los Bernoulli, aunque el centro del capítulo es el *Ars Conjectandi* del Jakob de la segunda generación y, dentro del mismo, su "teorema de oro", uno de los muchos que en matemáticas o física se conoce por "teorema de Bernoulli" y que recibe actualmente el nombre de "ley de los grandes números", soporte del cálculo de probabilidades.

El tercer capítulo se dedica al número pi, cociente de la longitud de la circunferencia por su diámetro; pi le da pie para abordar Arquímedes y su método de cálculo de dicho número por medio de polígonos de $2n$ lados, y al mismo tiempo, para relatar los intentos de Goodwin en 1897 de establecer por vía legal en el parlamento de Indiana la cuadratura del circulo y el valor 4 para el número pi.

Recorridas la aritmética, el cálculo de probabilidades y la geometría, la *D* corresponde al cálculo diferencial. En este capítulo se incide sobre la célebre polémica Newton-Leibniz en los orígenes del cálculo diferencial, con referencias muy directas a los trabajos de ambos, los *Calculi* de Leibniz en los *Acta Eruditorum* de 1684 y el trabajo de Newton sobre las "fluxiones" entre 1664 y 1666. En la *K* (por Koniglicher) de Newton y la *L* de Leibniz vuelve Dunham sobre ambos autores. En el capítulo de Newton pone especial énfasis en el cálculo de raíces aproximadas de ecuaciones polinómicas y en el de Leibniz, en la introducción del cálculo integral.

En los capítulos *E* y *F* se habla de Euler y Fermat. Se ofrecen algunas pinceladas de la obra del primero, los números amigos (cada uno de ellos es suma de los divisores propios del otro), el curioso teorema de Euler que establece la conciclicidad de los pies de las alturas y los puntos medios de los lados de un triángulo, el cálculo de la suma de los inversos de los cuadrados de los números naturales, etcétera. En este capítulo se desarrolla la prueba de que hay las mismas posibilidades de escribir un número natural como suma de números distintos que como suma de números impares. En el proceso se analizan la habilidad técnica de Euler y su genio matemático. De entre la obra de Fermat, Dunham destaca, tras abordar las parábolas e hipérbolas de Fermat, $y = xn$, $y = 1/xn$, su trabajo en teoría de números. Estudia tres aspectos concretos: la descomposición en suma de dos cuadrados de los números primos congruentes con uno módulo cuatro (resultado conjeturado por Mersenne y acotado por Fermat, que probó que un primo congruente con tres módulo cuatro no se puede escribir como suma de dos cuadrados, pero no que esta descomposición es posible para los congruentes con uno, lo que fue probado por Euler cien años después), el método de Fermat de busca de factores en números compuestos y el célebre "último teorema de Fermat", hoy de dominio común.

Los capítulos *G* y *H*, geometría griega e hipotenusa, son continuación natural uno del otro. Mas, en su afán de asombrar al lector, los protagonistas elegidos para ambos por Dunham son Euclides y el presidente de los EE.UU. Garfield, prestándose parecido interés a la obra del primero y a la demostración del teorema de Pitágoras hecha por el segundo. De los *Elementos* se seleccionan algunos teoremas sobre el triángulo, que se demuestran substituyendo la referencia explícita a los axiomas por la admisión, "de sentido común", de los resultados previos necesarios. La geometría se completa con el problema isoperimétrico (capítulo *I*), con otro de los problemas clásicos, la trisección del ángulo (capítulo *T*), con un estudio del cálculo de la superficie de los sólidos en la *Esfera y el Cilindro* y con una breve exposición de la geometría analítica en el capítulo "El plano *X Y*" dedicado a Descartes.

Intercalados entre esos capítulos hay otros de curiosidades matemáticas. Por ejemplo, el capítulo *J*, *Sí o no*, justifica una serie de máximas matemáticas con ejemplos. Los títulos son significativos: "dos ejemplos no bastan", "cuanto más simple mejor" o "se puede demostrar también la no existencia". En la misma línea, el capítulo *U* se consagra a probar la utilidad de las matemáticas en una serie de aplicaciones más o menos conocidas, pero todas de carácter elemental.

Los capítulos biográficos se completan con el dedicado a Bertrand Russel a través de la célebre "Paradoja" y el de Gauss, situado, muy adecuadamente, en la *Z* de número complejo.

JOSÉ MANUEL AROCA



Las incisiones de esta tablilla babilónica simbolizan distintos números

John MacChesney

Fibras ópticas

John MacChesney, de los Laboratorios Bell

En una red comercial de telecomunicaciones pueden transmitirse unos 10.000 millones de bits por segundo a través de un enlace por fibra óptica, el equivalente a decenas de miles de conversaciones telefónicas. De grueso capilar, estas fibras constan de dos capas concéntricas de vidrio de sílice de gran pureza, el alma y la vaina, ambas rodeadas de un revestimiento protector. Los impulsos luminosos, emitidos por un láser o un fotodiodo, se propagan por el alma, sin penetrar en la vaina.

Los rayos permanecen confinados en el alma porque la vaina posee un índice de refracción menor, que cifra su capacidad para desviar la luz. Los perfeccionamientos en las fibras ópticas, combinados con el desarrollo de nuevos láseres y diodos, permitirán a los circuitos comerciales admitir billones de datos por segundo.

UNA FIBRA MULTIMODO DE INDICE ESCALONADO posee un alma grande, de hasta 100 micras de diámetro. En virtud de ello, algunos de los rayos de luz que componen el pulso digital pueden viajar en línea recta, mientras otros zigzaguean rebotando en la vaina. Estas distintas trayectorias hacen que los diferentes agrupamientos de rayos, los modos, lleguen por separado al punto receptor. El pulso, una agregación de modos diferentes, comienza a ensancharse, perdiendo su forma bien definida. La necesidad de espaciar los pulsos para evitar su solapamiento limita el ancho de banda, es decir, la cantidad de información que puede enviarse. Por consiguiente, este tipo de fibra es la más adecuada para transmisión a cortas distancias; en un endoscopio, por ejemplo.

LA REFLEXION INTERNA TOTAL confina dentro del alma a los rayos de luz. Como la vaina posee un índice de refracción menor, los rayos se reflejan hacia el interior del alma si inciden en la vaina bajo un ángulo poco inclinado (*líneas rojas*). Un rayo que exceda de cierto ángulo "crítico" escapará de la fibra (*línea amarilla*).

UNA FIBRA MULTIMODO DE INDICE GRADUAL contiene un alma cuyo índice de refracción disminuye gradualmente desde su eje geométrico hacia la vaina. El mayor índice de refracción del centro hace que los rayos que avanzan por el eje vayan más despacio que los situados más cerca de la vaina. Además, a causa del índice gradual, en vez de zigzaguear, la luz dentro del alma se curva en forma de hélice y se reduce la distancia de recorrido. Esta combinación de menor recorrido y de mayor velocidad permite a la luz de la periferia llegar al receptor casi a la vez que los rayos más lentos, pero rectos, del eje del alma. Resultado: un pulso digital sufrirá menos dispersión. Estas fibras suelen ser el medio físico de las redes de área local.

UNA FIBRA MONOMODO posee un alma estrecha (ocho micras o menos) y el índice de refracción entre el alma y la vaina varía menos que en el caso de las fibras multimodo. Así la luz viaja paralela al eje, creándose muy poca dispersión. Las redes telefónicas y de televisión por cable instalan al año millones de kilómetros de fibra.

Número extraordinario y monográfico de noviembre

NUEVOS FARMACOS PARA UN NUEVO ENFOQUE DE LA TERAPIA



Merced al avance de la bioquímica y de la genética molecular, sumado al refinamiento de las técnicas de análisis y síntesis, el sueño de todo laboratorio farmacéutico comienza a adquirir perfiles de realidad: idear y fabricar nuevas moléculas que estén dotadas de las propiedades terapéuticas deseadas.